

Министерство образования и науки РФ
Уральский федеральный университет

Г. А. Орлов

**ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА
И ВОЛОЧЕНИЕ ТРУБ**

Учебное пособие

Екатеринбург
УрФУ
2011

УДК 621.774.3:621.77.016.3(075.8)

ББК 34.748я73

О-66

Рецензенты:

кафедра металлургии Южно-Уральского государственного технического университета (зав. каф. – проф. д-р техн. наук В. А. Белевитин);
д-р техн. наук С. В. Смирнов

Г. А. Орлов

**О-66 Холодная прокатка и волочение труб: учебное
пособие / Г. А. Орлов. Екатеринбург: УрФУ, 2011. 188 с.**

ISBN 978-5-321-01377-9

Приведены режимы операций производства труб холодной прокаткой и волочением. Рассмотрены этапы разработки технологии производства холоднодеформированных труб. Значительное внимание уделено технологическим расчетам в процессах холодной прокатки на станах валкового и роликового типов и волочения. Методики расчетов усилий, калибровок инструмента, производительности станков, проверки технологических ограничений иллюстрированы примерами.

Предназначено для студентов направления «Металлургия», профиль «Обработка металлов давлением», может быть полезна аспирантам данной специальности.

Библиогр.: 15 назв. Табл. 25. Рис. 36.

УДК 621.774.3:621.77.016.3(075.8)

ББК 34.748я73

ISBN 978-5-321-01377-9

© Уральский федеральный
университет, 2011

© Орлов Г. А., 2011

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Общие сведения о производстве холоднодеформированных труб	6
1.1.Классификация труб	6
1.2.Требования нормативных документов	8
1.3.Особенности производства холоднодеформированных труб	14
1.4.Изменение свойств металла при холодной пластической деформации	17
2. Общая характеристика операций производства холоднодеформированных труб	23
2.1. Операции холодной пластической деформации	23
2.2. Химическая обработка	32
2.3. Термическая обработка	42
2.4. Механическая обработка	47
3. Разработка технологии изготовления труб	50
3.1. Выбор схемы производства	50
3.2. Выбор исходной заготовки	53
3.3. Расчет размеров труб по проходам	58
3.4. Потери металла на вспомогательных операциях	62
3.5. Составление технологической карты	63
3.6. Примеры расчета маршрутов	67
4. Прокатка на станах ХПТ	76
4.1. Основные понятия и определения	76
4.2. Соотношения в мгновенном очаге деформации	80
4.3. Расчет калибровки инструмента	89
4.4. Расчет силовых параметров	115
4.5. Режимы прокатки	126
4.6. Производительность станов	129

4.7. Расчет поврежденности металла	130
4.8. Технологические ограничения	132
5. Прокатка на станах ХПТР	139
5.1. Особенности конструкции станов	139
5.2. Скоростные условия роликовой прокатки	142
5.3. Расчет калибровки инструмента	144
5.4. Расчет силовых параметров	149
5.5. Настройка стана ХПТР	160
5.6. Режимы прокатки	161
5.7. Расчет поврежденности металла	163
5.8. Технологические ограничения	164
6. Волочение	166
6.1. Калибровка трубоволоочильного инструмента	166
6.2. Расчет усилий волочения	175
6.3. Расчет производительности станов	180
6.4. Расчет поврежденности	181
6.5. Проверка технологических ограничений	183
Литература	187

Введение

В 2009 году в России произведено около 6,6 млн. тонн труб (8 % мирового производства), из них примерно пятая часть – холоднодеформированные. Интересно, что в Свердловской области производится примерно 2,2 млн. тонн стальных труб, а в советское время объем отечественного производства труб составлял 20 млн. тонн.

Низкая доля холоднодеформированных труб в общем выпуске частично объясняется их малыми размерами, а также определенным отставанием России в плане разработки новых видов оборудования, технологических смазок и инструмента для получения высокоточных труб. В связи с развитием нефте- и газодобывающих отраслей промышленности наибольшую долю в выпуске труб составляют трубы нефтяного сортамента и газопроводные.

Необходимость холодного передела вызвана следующими причинами:

- возможностью получения мелких труб диаметром менее 5 мм и толщиной стенки до 0,05 мм, а также профильных;
- более высокими показателями качества: точностью, чистотой поверхности, механическими свойствами холоднодеформированных труб.

В настоящем учебном пособии рассмотрены классические способы прокатки и волочения труб, приведены алгоритмы и примеры технологических расчетов при производстве холоднодеформированных труб.

1. Общие сведения о производстве холоднодеформированных труб

1.1. Классификация труб

Основной сортament холоднодеформированных труб – круглые с круглым отверстием диаметром 0,3...450 мм и толщиной стенки 0,1...22 мм. В дальнейшем основное внимание уделено изготовлению таких труб. Трубы классифицируют по следующим признакам.

По форме поперечного сечения: круглые и профильные – квадратные, овальные, многоугольные, с наружными и внутренними продольными ребрами, плавниковые, гофрированные, с продольными канавками в стенке, переменного поперечного сечения и др.

По маркам материала: трубы изготавливают более чем из 300 марок сталей и сплавов. Используются следующие стали:

- углеродистые (Ст 10, 20, 45 и др.), легированные (40Х, 30ХГСА, 38ХС, 12Х1МФ, 38Х2МЮА, ШХ 15 и др.);
- коррозионно-стойкие (нержавеющие), легированные хромом и никелем (08Х18Н10Т, 12Х18Н10Т, 03Х12Н10МТ, 07Х16Н6, 03Х18Н12ВМ, Х15Н5Д2ТЮ);
- жаростойкие и жаропрочные стали и сплавы, сохраняющие эксплуатационные свойства при температурах более 600⁰С (12Х21Н5Т, 15Х20Н12Т и др.).

Цветные металлы и сплавы:

- титановые (ВТ1-0, ОТ4-0, ВТ 5 и др.);
- алюминиевые (Д1, АД-1, АМц, АМг6 и др.);
- медные (легированные оловом (бронзы) и легированные цинком (латуни Л96, Л68, Л63 и др.);

- прочие сплавы на основе циркония, молибдена, хрома и др. Эти сплавы обладают уникальными свойствами (хром и молибден придают жаропрочность, цирконий – радиационную стойкость).

По относительной тонкостенности D/S (D – наружный диаметр; S – толщина стенки):

- особотонкостенные – $D/S > 50$, а также имеющие $S < 0,5$ мм при $D < 20$ мм;
- тонкостенные – $D/S = 20 \dots 50$, а также имеющие $S < 1,5$ мм при $D < 20$ мм;
- нормальной тонкостенности – $D/S = 9 \dots 20$;
- толстостенные – $D/S = 5,5 \dots 9$;
- особотолстостенные – $D/S \leq 5,5$.

По крупности:

- капиллярные – $D < 5$ мм;
- мелкие – $D = 5 \dots 12$ мм;
- средние – $D = 12 \dots 60$ мм;
- крупные – $D = 60 \dots 120$ мм;
- сверхкрупные – $D > 120$ мм.

Сочетание параметров D/S и D определяет трудоемкость изготовления труб. Менее трудоемко изготовить трубы средних размеров нормальной тонкостенности. Любые отклонения от этих значений повышают трудоемкость и удорожают продукцию.

По типу исходной заготовки: бесшовные, сварные.

По способу холодной деформации: холоднокатаные, холоднотянутые.

По качеству поверхности: обычного качества, безрисочные, электрополированные.

По состоянию материала: упрочненные (наклепанные, нагартованные), термообработанные (отожженные) и термоупрочненные.

По назначению: общего назначения, топливопроводные, водопроводные, для судостроения, автомобильной промышленности, авиации, химического машиностроения, котельные, подшипниковые и др.

1.2. Требования нормативных документов

В нормативной документации (ГОСТах, зарубежных стандартах, технических условиях и др.) содержатся технические требования к готовым трубам, которые определяют их качество. Перечень некоторых нормативных документов приведен в табл. 1.1.

Таблица 1.1
Стандарты и технические условия на некоторые виды труб

Номер документа	Название документа
1	2
ГОСТ 494–90	Трубы латунные. Технические условия
ГОСТ 550–75*	Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности
ГОСТ 617–90	Трубы медные. Технические условия
ГОСТ 800–78	Трубы бесшовные холоднодеформированные из стали марок ШХ 15 и ШХ 15-Ш для колец шариковых и роликовых подшипников
ГОСТ 1060–83	Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные для судостроения
ГОСТ 8733–87**	Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные и теплодеформированные. Технические условия
ГОСТ 8734–75	Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные. Сортамент
ГОСТ 9567–75	Трубы стальные прецизионные из сталей марок 10, 20, 35, 45, 30ХГСА
ГОСТ 9941–81	Трубы бесшовные холодно- и теплодеформированные из коррозионно-стойкой стали
ГОСТ 10498–82	Трубы бесшовные особотонкостенные из коррозионно-стойкой стали
ГОСТ 11017–80	Трубы стальные бесшовные высокого давления для дизельных топливопроводов
ГОСТ 1416–279	Трубки стальные малых размеров капиллярные
ГОСТ 19277–73	Трубы стальные бесшовные для маслопроводов и топливопроводов
ГОСТ 21729–76**	Трубы конструкционные холодно- и теплодеформированные из углеродистых и легированных сталей
ГОСТ 22897–86	Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплавов на основе титана
ГОСТ 24030–80	Трубы бесшовные из коррозионно-стойкой стали для энергомашиностроения

Продолжение таблицы 1.1

ASTM A 213/A 213M-95	Бесшовные ферритные и аустенитные легированные котельные, пароперегревательные и теплообменные трубы
ASTM A 312/A 312M-95	Бесшовные и сварные трубы из аустенитных нержавеющих марок стали
DIN 17458-85	Трубы бесшовные круглые из аустенитных нержавеющих сталей с особыми требованиями
DIN 17456-85	Трубы бесшовные круглого сечения из коррозионно-стойких сталей общего назначения
DIN 17459-92	Трубы круглые из жаропрочных аустенитных марок стали
DIN EN 10305	Трубы стальные прецизионные
DIN 17175; 2448	Трубы котельные из жаропрочной стали
ТУ 14-3Р-55-2001	Трубы стальные бесшовные холодно- и теплодеформированные из высоколегированных сталей для паровых котлов и трубопроводов
ТУ 14-3-480-76	Трубы стальные бесшовные высокого давления из стали 20А для топливной аппаратуры
ТУ 14-3-956-80	Трубы малых размеров из углеродистой стали
ТУ 14-3-966-80	Трубы стальные бесшовные холоднодеформированные особотонкостенные
ТУ 14-3Р-197-2001	Трубы бесшовные из коррозионно-стойкой стали с повышенным качеством поверхности, холоднокатаные
ТУ 14-3-460-2003	Трубы стальные бесшовные для паровых котлов и трубопроводов
ТУ 14-161-216-2003	Трубы бесшовные холоднодеформированные из стали марки 09Х18Н9 с повышенным качеством поверхности
ТУ 14-3-571-77	Трубы бесшовные холоднодеформированные из сплава ХН60ВТ для авиационной промышленности
ТУ 14-3-731-78	Трубы бесшовные толстостенные горяче- и холоднодеформированные из коррозионно-стойкой стали марки 12Х18Н10Т для установок высокого давления
ТУ 14-3Р-760-2006	Трубы бесшовные холоднодеформированные длинномерные с повышенным качеством поверхности из аустенитной стали и железоникелевого сплава
ТУ 14-3-769-78	Трубы безрисочные холоднодеформированные из коррозионно-стойких сталей
ТУ 14-3-796-79	Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионно-стойкой стали для паровых котлов и трубопроводов
ТУ 14-3-969-80	Трубы бесшовные теплодеформированные
ТУ 14-3-1233-84	Трубы бесшовные холоднодеформированные из марки стали 09Х18Н9 с повышенным качеством поверхности

Примечания:* предельные отклонения группы Б – по ГОСТ 8734-75.

** предельные отклонения труб обычной точности – по ГОСТ 8734-75;
прецизионных – по ГОСТ 9567-75.

В соответствии с ГОСТ 15467-79 качество продукции – это совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. При разработке технологии производства труб необходимо учитывать технические требования, чтобы изготовить трубы требуемого качества.

Качество продукции, в нашем случае холоднодеформированных труб, оценивается совокупностью показателей качества или технических требований. Эти показатели подразделяют на три группы:

- характеризующие точность труб, то есть степень соответствия формы и размеров;
- физико-химических свойств;
- качества поверхности.

Размеры труб круглого поперечного сечения обычно характеризуются наружным диаметром D , толщиной стенки S и длиной L . В некоторых случаях для труб с повышенными требованиями к внутреннему каналу регламентируется внутренний диаметр d . Сортамент изготавливаемых труб обычно характеризуют номинальными значениями размеров $D_n \times S_n \times L_n$. В реальных условиях производства невозможно получить абсолютно точные размеры труб, поэтому в нормативной документации указываются допускаемые отклонения размеров или погрешность изготовления, связанные с неточностью изготовления инструмента, настройкой станков, квалификацией вальцовщика и др. Чем меньше эти погрешности, тем выше точность труб.

Абсолютное допускаемое отклонение размера $P \in \{D_n, S_n, L_n\}$ – это максимально допустимая разность между экстремальным и номинальным значением размера: $\Delta P_{max} = P_{exr} - P$, где $P_{exr} \in \{P_{max}, P_{min}\}$.

Относительное отклонение обычно задается в процентах:

$$\delta_{p\ max} = (\Delta P_{max}/P)100\%.$$

Отклонения размеров могут быть как положительными, так и отрицательными.

Действительные отклонения ΔP и δ_p должны быть меньше нормативных (максимально допускаемых) значений отклонений:

$$|\Delta P| \leq |\Delta P_{\max}|;$$

$$|\delta_p| \leq |\delta_{p\max}|.$$

Прямолинейность труб оценивают кривизной на 1 м длины. Обычно кривизна не должна превышать 1...1,5 мм на метр длины готовой трубы.

Трубы мерной длины обычно поставляются порезанными по 6–9 м, что оговаривается в нормативных документах в зависимости от размеров поперечного сечения. Предельные отклонения на мерные длины обычно составляют $\pm(10-15)$ мм, то есть в выше принятых обозначениях $|\Delta L_{\max}| = 10 - 15$ мм.

По точности трубы подразделяются на категории качества: первая, высшая – по ГОСТ 1060–83; обычные и прецизионные повышенного качества; обычной, повышенной и высокой точности из коррозионно-стойкой стали; нормальной и повышенной точности из цветных металлов.

Требования по точности некоторых видов труб представлены в табл. 1.2, где, например, по ГОСТ 8734–75 предельные отклонения диаметра труб 30–50 мм составляют $|\Delta D_{\max}| = 0,4$ мм, а относительные предельные отклонения на толщину стенки 1–5 мм – $|\delta_{s\max}| = 10\%$.

Вторая группа технических требований – показатели физико-химических свойств. Здесь регламентируются следующие характеристики: химический состав стали или сплава; механические свойства (относительное удлинение δ , относительное сужение ψ , предел текучести σ_t , временное сопротивление σ_b , твердость, удельная вязкость и некоторые другие). Для некоторых видов труб регламентируется микроструктура, для чего предусматривается отрезка образцов для изготовления микрошлифов. У труб из коррозионно-стойких сталей, например, проверяется склонность к межкристаллитной коррозии.

Таблица 1.2

Показатели точности некоторых видов труб

Нормативная документация	Параметры	Размер, мм	Предельные отклонения
ГОСТ 8734-75	Наружный диаметр	5-10	$\pm 0,15$ мм
		10-30	$\pm 0,3$ мм
		30-50	$\pm 0,4$ мм
		> 50	$\pm 0,8$ %
	Толщина стенки	< 1	$\pm 0,12$ мм
		1-5	± 10 %
	Кривизна	1000	1-2 мм
ГОСТ 9941-81	Наружный диаметр	5-10	$\pm(0,15-0,3)$ мм
		10-30	$\pm(0,2-0,4)$ мм
		30-95	$\pm(1-1,2)$ %
	Толщина стенки	0,3-0,4	$\pm(0,05-0,07)$ мм
		0,5-0,6	$\pm(0,07-0,1)$ мм
		0,7-1,0	$\pm(0,1-0,15)$ мм
		> 1	$\pm(10-12,5)$ %
	Кривизна	1000	1-2 мм
DIN EN 10305	Наружный диаметр	4-30	$\pm 0,08$ мм
		32-40	$\pm 0,15$ мм
		42-50	$\pm 0,20$ мм
		55-60	$\pm 0,25$ мм
	Толщина стенки	0,5-12	± 10 %
	Кривизна	Качение по наклонной плоскости	
ASTM A 213, A 312	Наружный диаметр	10-38	$\pm(0,1-0,15)$ мм
		> 38	$\pm 0,2$ мм
	Толщина стенки	Весь сортament	$+(20-22)$ %
	Кривизна	Качение по наклонной плоскости	

Для некоторых видов труб предусматривается анализ микроструктуры: контролируется величина зерна, неметаллических включений и др.

Это, например, подшипниковые трубы (ГОСТ 800–78), трубы из коррозионно-стойкой стали для энергомашиностроения (ГОСТ 24030–80), особотонкостенные (ГОСТ 10498–82).

В большинстве случаев также предусматривается проведение испытаний технологических свойств труб: на сплющивание, раздачу, изгиб, бортование, испытание гидростатическим давлением и др.

Третья группа технических требований регламентирует качество поверхности. Различают трубы с обычным и повышенным качеством поверхности (безрисочные), а также электрополированные.

Трубы из конструкционных сталей, подшипниковые и из цветных металлов поставляются с обычным качеством поверхности, которое описывается словесно: на наружной поверхности не должно быть трещин, закатов, рванин и др. Допускаются дефекты механического происхождения (вмятины, риски и др.), не выводящие размеры труб за пределы отклонений. Поверхность труб из коррозионно-стойкой стали должна быть светлой или матовой с серым оттенком.

В последнее время начали применяться и количественные характеристики качества поверхности. Так, в германском стандарте DIN EN 10305-2 (2003 г.) на стальные прецизионные холодноотянутые трубы требуется, чтобы трубы имели гладкую наружную и внутреннюю поверхность с шероховатостью $R_a \leq 4$ мкм. Отечественные ТУ У 27.2-05757883-149.2007 «Трубы бесшовные высокоточные повышенной коррозионной стойкости из стали марки 03X17H14M3 для теплообменного оборудования турбоагрегатов АЭС» также вводят нормирование шероховатости поверхности по параметру R_a ГОСТ 2789–73. Шероховатость наружной и внутренней поверхностей должна иметь среднее значение R_a не более 1,0 мкм; максимальное значение – не более 1,5 мкм. Аналогичные показатели введены и в других ТУ на трубы для атомной энергетики.

При разработке технологии изготовления труб необходимо выполнить перечисленные выше три группы требований, для чего назначить рациональную последовательность операций, правильно выбрать режимы обработки на имеющемся оборудовании, рассчитать калибровки инструмента и обеспечить качественное его изготовление.

1.3. Особенности производства холоднодеформированных труб

Особенности изготовления на отечественных заводах холоднодеформированных труб, в отличие от автоматизированных технологий производства горячекатаных труб на трубопрокатных агрегатах и электросварных труб на трубозлектросварочных агрегатах, заключаются в следующем:

- в связи с малыми коэффициентами вытяжки за один проход для получения труб малых размеров используется многопроходная и циклическая схема производства;
- для обработки труб между проходами (термическая и химическая обработка) применяется пакетный способ обработки;
- многоциклическая обработка труб приводит к повышенному расходу металла и удорожает трубы;
- пакетный способ обработки связан с большим объемом транспортных операций, что повышает численность работающих и себестоимость труб.

Технологию изготовления холоднодеформированных труб можно представить в виде последовательности операций, которые условно разделяют на **основные** (прокатку и волочение) и **вспомогательные** (не связанные с формоизменением труб). В технологическом цикле присутствуют также **транспортные** операции по формированию и доставке пакетов труб на мостовых кранах (вдоль пролета цеха) и на железнодорожных тележках между пролетами. Также применяются операции

по контролю качества труб. Структурная схема операций представлена на рис. 1.1.

Цикл обработки труб включает основную операцию (проход прокатки или волочения) и сопутствующие вспомогательные операции, которые могут частично или полностью повторяться в последующем цикле.

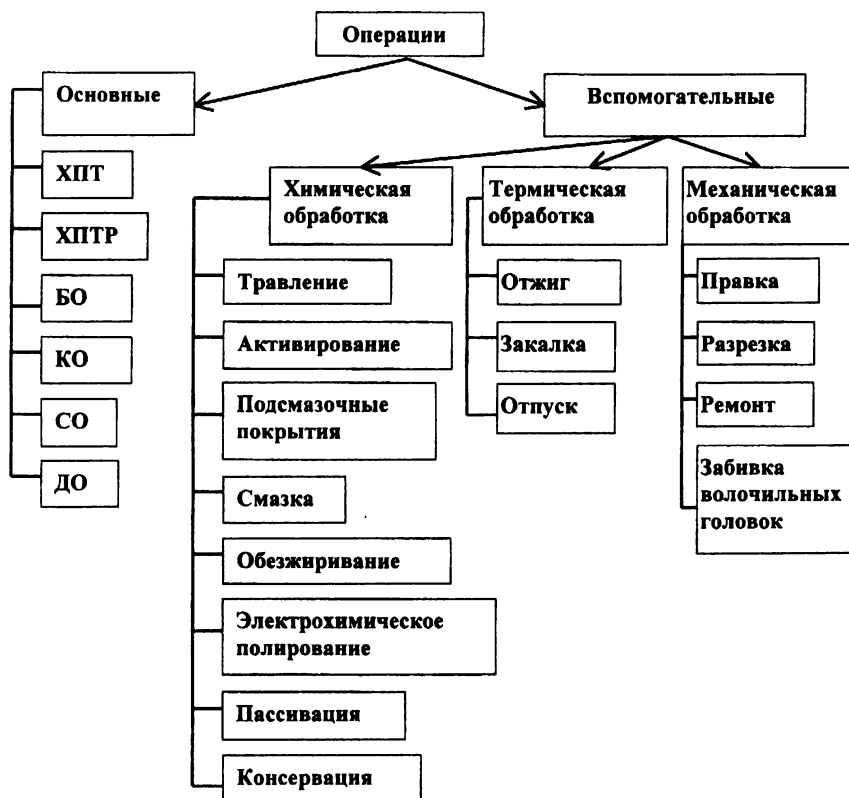


Рис. 1.1. Структура операций производства холоднодеформированных труб

Нулевой цикл (0-цикл) — последовательность вспомогательных операций, которым подвергается исходная заготовка, поступающая, например, с трубопрокатного агрегата.

Каждая операция выполняется на отдельно стоящем оборудовании, которое в цехе сгруппировано в отделы (участки): холодной прокатки, волочения, термообработки, травления, отделки и др.

Такая технология изготовления труб малопроизводительна и архаична, но пока неизбежна, так как не решены вопросы поштучного проведения вспомогательных операций, главным образом термической и химической обработки.

Для повышения эффективности производства холоднодеформированных труб и снижения цикличности развиваются следующие направления:

- повышение разовых деформаций за проход, например, за счет совершенствования конструкций прокатных станов (применение четырехвалковых клетей "тандем");
- использование исходной заготовки минимальных размеров, например, электросварной;
- сокращение числа вспомогательных операций, например, применения безотжиговой прокатки, обработки без подсмазочных покрытий, исключения обезжиривания за счет использования самовозгоняющихся смазок;
- совмещение основных и вспомогательных операций (волочения и правки, резки "на ходу", термоправки и др.).

1.4. Изменение свойств металла при холодной пластической деформации

1.4.1. Упрочнение

В настоящее время доказан дислокационный механизм пластической деформации. В процессе холодной пластической деформации движение дислокаций все более затрудняется, что приводит к упрочнению металла или наклепу. Упрочнение оценивают изменением сопротивления деформации. Обычно это изменение выражают степенной функцией:

$$\sigma_s = \sigma_{0,2} + g\Lambda^g, \text{ МПа}, \quad (1.1)$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести металла исходной заготовки; g, ϵ – эмпирические коэффициенты (табл. 1.3); Λ – степень деформации сдвига [1, 2].

Упрочнение сопровождается ростом прочностных характеристик. Для расчета силовых параметров прокатки и волочения часто используется временное сопротивление, которое с учетом упрочнения рассчитывается по экспериментальным данным, аппроксимированным формулой [1, 2]:

$$\sigma_{\epsilon} = \sigma_{\epsilon_0} + q\epsilon_i^c, \text{ МПа}, \quad (1.2)$$

где $\sigma_{\epsilon_0}, q, c$ – эмпирические коэффициенты для разных марок сталей и сплавов, приведенные в табл. 1.3;

$$\epsilon_i = \frac{(\bar{F}_0 - \bar{F}_i)}{\bar{F}_0} 100\% = \left(1 - \frac{1}{\mu_i}\right) \cdot 100\%, \quad (1.3)$$

ϵ_i – относительное обжатие поперечного сечения трубы с \bar{F}_0 до \bar{F}_i .

Таблица 1.3

Показатели механических свойств сталей и сплавов [2]

Характеристика сплава	Исходная заготовка	$\sigma_{\theta} = \sigma_{\theta_0} + q\epsilon^c$			$\sigma_s = \sigma_{0,2} + g\Lambda^{\theta}$			$\psi, \%$	$\Lambda_p = \exp \left[\frac{a_1 + a_2\mu_{\sigma} + (a_3 + a_4\mu_{\sigma})}{T} \right] a = a_0$					$\frac{1+0,238 \frac{\sigma}{T}}{T}$		
		$\sigma_{\theta_0},$ МПа		$q,$ МПа	C	$\sigma_{0,2},$ МПа	$g,$ МПа		θ	a_1	a_2	a_3	a_4		a_0	
Углеродистые	10	363	27,3	0,62	0,62	280	261	0,63	74,5	-0,74	-1,19	-0,86	2,37			
	20	500	5,7	0,98	0,98	280	418	0,39	60,8	-0,65	-0,78	-0,12	2,80			
	45	574	14,1	0,83	0,83	405	502	0,32	54,8	-0,65	-0,73	0,08	3,11			
	38ХС	1033	7,4	0,93	0,93	654	787	0,34	60,4	-1,47	-1,11	0,29	2,96			
	12Х1МФ	550	14,7	0,86	0,86	309	482	0,28	74,2	-0,15	-0,49	-0,11	1,62			
Легированные	30Х1ТСА	628	33,4	0,61	0,61	529	708	0,40	68,4	-1,18	-1,15	0,19	1,67			
	38Х2МЮА	961	14,7	0,86	0,86	430	520	0,46	73,8	-0,52	-0,67	0,00	1,90			
	ШХ 15	570	18,6	0,79	0,79	386	550	0,48	64,1	-0,86	-0,58	-0,13	3,90			
	08Х18Н10Т	667	19,0	0,84	0,84	322	813	0,41	71,0	-0,38	-0,68	-0,17	1,40			
	03Х12Н10МТ	895	14,7	0,86	0,86	745	431	0,32	79,0	-1,24	-1,13	-0,18	1,70			
Коррозионно-стойкие	07Х16Н6	804	14,7	0,86	0,86	552	1425	0,31	68,4	-2,14	-0,73	0,59	1,25			
	Х15Н5Д2ТЮ	891	14,7	0,86	0,86	612	700	0,37	70,1	-1,24	-0,54	0,41	1,20			
	ВТ 1-0	589	21,6	0,62	0,62	553	421	0,52	62,6	-1,18	-0,40	0,40	2,29			
Титановые	ОТ 4-0	804	15,7	0,73	0,73	601	370	0,56	52,9	-1,55	-0,52	0,52	2,25			
	АД-1	184	5,5	0,73	0,73	48	83	0,44	83,5	0,36	-1,10	-0,58	1,73			
	АМЦ	108	2,7	0,81	0,81	74	145	0,30	69,4	-0,20	-1,98	-1,47	4,50			
Алюминиевые	АМГ-6	216	6,5	0,63	0,63	196	319	0,26	38,1	-0,05	-1,27	-0,56	1,58			
	Л 96	270	13,7	0,68	0,68	68	275	0,51	80,7	-0,29	-0,94	-0,19	1,82			
	Л 68	319	10,8	0,80	0,80	104	381	0,50	72,3	-0,36	-0,33	0,07	2,06			
Медные	Л 63	353	5,9	0,94	0,94	112	415	0,42	64,2	-0,44	-0,35	0,09	1,98			
	сплав хром-железо	1220	14,7	0,90	0,90	600	1253	0,30	55,9	-1,58	-1,29	0,30	1,11			
	сплав циркония	579	28,5	0,70	0,70	537	600	1,00	78,9	-1,19	-0,40	-0,19	3,12			
Прочие	молибден МЧ	696	14,1	0,87	0,87	481	363	0,16	67,4	-0,30	-0,31	0,29	1,77			

* Примечание: г/д – после горячей деформации; т/о – после горячей деформации и термообработки.

1.4.2. Накопление поврежденности

В настоящее время общепризнано, что деформирование тела сопровождается накоплением повреждений (микропустот) в структуре металла. Показано также, что накопление повреждений сопровождается пластическим «разрыхлением», то есть остаточным увеличением объема металла. Причем увеличение «разрыхления» пропорционально предельной деформации сдвига. В теории ОМД исследования разрыхления при больших пластических деформациях выполнены А. А. Богатовым и С. В. Смирновым [1] путем гидростатического взвешивания образцов. Установлено, что увеличение объема (снижение плотности) при холодной пластической деформации может составлять до 1% и определяет величину поврежденности.

Понятие поврежденности известно из теории усталостного разрушения и теории ползучести. Принцип линейного суммирования повреждений положен в основу существующих критериев деформируемости металлов без разрушения, развитию которых способствовали работы отечественных механиков А. А. Ильюшина, Ю. Н. Работнова, Л. М. Качанова, В. В. Новожилова и др.

В настоящее время современные представления о накоплении поврежденности при холодной пластической деформации сформулированы А. А. Богатовым [1]. Условие деформирования без разрушения при холодной деформации с учетом залечивания микродефектов при термической обработке им предложено в виде

$$\omega = \sum_{j=1}^k \left(\sum_{i=1}^{n_j} \int_0^{\Lambda_i} \frac{\Lambda^a}{\Lambda_p^a} d\Lambda - \Delta\omega_j \right) < 1, \quad (1.4)$$

где ω – поврежденность металла; n_j – число этапов знакопеременной деформации на j -м цикле пластической и термической обработки; k – число

таких циклов; $\Delta\omega_j$ – уменьшение поврежденности металла на j -м цикле термической обработки; Λ – степень деформации сдвига;

$$\Lambda_p = \exp \left[a_1 + a_2 \mu_\sigma + (a_3 + a_4 \mu_\sigma) \frac{\sigma}{T} \right], \quad (1.5)$$

Λ_p – пластичность металла;

$$a = a_0^{1+0,238 \frac{\sigma}{T}}, \quad (1.6)$$

a – коэффициент пластического разрыхления; $a_0 \dots a_4$ – эмпирические коэффициенты (табл. 1.3); $\frac{\sigma}{T}$ – показатель напряженного состояния; μ_σ – коэффициент Лодса.

Методика проведения расчетов по формуле (1.4) изложена в [1], интегрирование ведется вдоль траектории движения частиц через очаг деформации.

Согласно [1], экспериментально определены пороговые значения поврежденности:

$$\omega^* = 0,2 \dots 0,3, \quad (1.7)$$

что соответствует образованию энергетически устойчивых микропор, которые не залечиваются при термообработке;

$$\omega^{**} = 0,6 \dots 0,7; \quad (1.8)$$

при этих значениях происходит объединение микропор в цепочки микротрещин, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик металлопродукции.

При $\omega = 1$ происходит макроразрушение металла, то есть образуются трещины, видимые невооруженным глазом.

Экспериментально установлено, что в процессе термической обработки стальных образцов происходит повышение пластических свойств за счет активизации диффузионных процессов и залечивания микродефектов.

Для определения итоговой поврежденности по формуле (1.4) С. В. Смирновым предложен расчет величины залечивания поврежденности при термической обработке $\Delta\omega$ в зависимости от величины поврежденности.

Если исходная поврежденность $\omega_0 < \omega^*$, происходит полное восстановление пластических свойств (залечивание микродефектов):

$$\omega = \Delta\omega \quad (1.9)$$

и после термообработки $\omega = 0$.

Если исходная поврежденность $\omega^{**} < \omega_0 < \omega^*$, то остаточная поврежденность после термической обработки рассчитывается по формуле

$$\omega = 0,578 \omega_0 - 0,14. \quad (1.10)$$

Если исходная поврежденность $\omega_0 > \omega^{**}$, то используется формула

$$\omega = 2,22 \omega_0 - 1,22. \quad (1.11)$$

Далее в соответствии с формулой (1.4) для расчета накопленной поврежденности за несколько циклов обработки величины остаточной поврежденности суммируются.

1.4.3. Деформационный разогрев

Повышение температуры или разогрев во время пластической деформации $\Delta\theta$ может достигать, в зависимости от условий процесса и свойств металла, нескольких сотен градусов. Формула для его расчета может быть получена согласно закону сохранения тепловой энергии при пластической деформации:

$$\Delta\theta = \eta T \Lambda / (c\rho), \quad (1.12)$$

где $\eta = 0,85$ – доля тепла, остающаяся в теле; T – интенсивность касательных напряжений; Λ – степень деформации сдвига; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность.

Остальное тепло (15%) уносится через контактные поверхности с валками, оправкой и конвекцией в окружающую среду.

1.4.4. Текстурирование и другие эффекты

При значительной холодной деформации кристаллы сплава приобретают определенную ориентировку, то есть образуется текстура деформации. Практическая важность текстур определяется тем, что они вызывают анизотропию свойств. В большинстве случаев анизотропия механических свойств нежелательна, и ее можно уменьшить изменением направления деформации или термической обработкой.

Фазовые и структурные превращения происходят при наклепе. Холодная деформация сопровождается увеличением накопленной энергии, что облегчает переход сплава в более стабильное структурное состояние. Практическое значение при этом имеют, например, ускорение мартенситного превращения, распад перенасыщенных твердых растворов и др.

Электропроводность. Наклеп чистых металлов и большинства сплавов повышает удельное электрическое сопротивление. Это связывают с повышением плотности искажений кристаллической решетки, рассеивающих электроны проводимости. Рост удельного электрического сопротивления может составлять 50% для сплавов, изменяющих фазовый состав при наклепе.

2. Общая характеристика операций производства холоднодеформированных труб

2.1. Операции холодной пластической деформации

2.1.1. Прокатка на станах ХПТ

ХПТ – станы холодной прокатки труб валкового типа периодического действия. Процесс включает холостой и рабочий периоды. В холостом периоде валки не касаются трубы, и производится подача очередной порции заготовки в валки и ее кантовка. В рабочем периоде труба обжимается по диаметру и стенке валками, имеющими ручки переменного радиуса на длинной слабоконической оправке. Труба прокатывается порциями, каждый объем подачи обжимается многократно, до 50 раз (это число называется коэффициентом дробности деформации). Поэтому достигаются значительные коэффициенты вытяжки – до 6.

Предельный коэффициент вытяжки за один проход можно рассчитать по формуле, учитывающей пластические свойства стали или сплава:

$$\mu_{np} = 0,1\psi - 2, \quad (2.1)$$

где ψ - относительное сужение образца трубной заготовки, % (табл. 1.3).

Прокатку рекомендуется вести с преимущественным обжатием по толщине стенки: соотношение коэффициентов вытяжки по стенке и диаметру $\mu_s/\mu_D > 1$. В связи с низкой производительностью станов ХПТ не прокатывают трубы с коэффициентом вытяжки $\mu < 2$.

Область применения. На стандартных станах прокатываются трубы умеренной тонкостенности с $D/S < 25$, особотонкостенные трубы не производят. Диаметр прокатываемых труб $D_T = 18 \dots 450$ мм, толщина стенки $S_T = 0,8 \dots 6$ мм. Прокатывают трубы из всех марок сталей и сплавов.

Достоинства.

- Высокие коэффициенты вытяжки, до 6, хорошая проработка структуры металла;
- отсутствие потерь металла;
- высокая точность и чистота поверхности.

Недостатки.

- Сложность оборудования и изготовления инструмента;
- низкая производительность (80–300 м/ч).

Станы обозначаются следующим образом: ХПТ-32, ХПТ-55, ХПТ-75, ХПТ-90, где цифра – максимальный диаметр прокатываемой трубы. Для прокатки крупных труб используются станы ХПТ-120, ХПТ-250; ХПТ-450. Технические характеристики станов холодной прокатки приведены в табл. 2.1.

Для некоторых марок сталей и сплавов (например, нержавеющей сталей, некоторых титановых сплавов) применяется теплая прокатка. Для этого перед валками устанавливается индуктор, где исходная заготовка подогревается до 100...200⁰С. Теплая прокатка позволяет снизить сопротивление деформации металла и повысить его пластичность, за счет чего можно вести прокатку с большими коэффициентами вытяжки, для нержавеющей сталей – до 4...7.

2.1.2. Прокатка на станах ХПТР

ХПТР – станы холодной прокатки труб роликового типа периодического действия. Так же, как и ХПТ, процесс включает холостой и рабочий периоды. Основные отличия процесса ХПТР от ХПТ заключаются в следующем:

- обжатие трубы производится тремя или четырьмя роликами, имеющими ручей постоянного радиуса, соответствующего радиусу готовой трубы;
- обжатие осуществляется за счет увеличения высоты опорных планок;

Таблица 2.1

Конструктивные и технологические параметры станов ХПТ и ХПТР

Характеристика	ХПТ-32	ХПТ-55	ХПТ-90	ХПТР 6-15	ХПТР 15-30	ХПТР 30-60
Диаметр заготовки, D_0 , мм	22...46	38...73	57...108	8...18	17...33	35...68
Длина заготовки, L_0 , м	1,5...5	1,5...5	1,5...5	1,5...5	1,5...5	1,5...5
Диаметр трубы, D_T , мм	16...32	25...55	40...90	6...15	15...30	30...60
Радиус калибров (роликов), R_0 , мм	150	182	217	18	31	41,5
Радиус ведущей шестерни, $R_{ш}$, мм	140	168	196	-	-	-
Подача, m , мм	2...30	2...30	2...30	1,3...8	1,3...9,2	1,3...9,2
Число двойных ходов, v , 1/мин	80...150	68...130	60...100	60...120	60...120	44...90
Длина хода клетки: <ul style="list-style-type: none"> • общая, $L_{кл}$, мм • за период подачи, ℓ_n, мм • за период поворота, ℓ_v, мм 	452 30 26	590 40 38	680 45 55	490 75 -	450 69 -	607 95 -
Мощность главного привода, N , кВт	70	110	150	30	55	75
Максимальное усилие прокатки, $[P]$, кН	800	1500	2200	100	400	800

- используется длинная цилиндрическая оправка.

В связи с ограничением обжатия по наружному диаметру предельный коэффициент вытяжки – до 2,5.

Область применения. На стандартных станах прокатываются тонкостенные и особотонкостенные трубы с $D/S > 25$ из высоколегированных сталей и сплавов. Диаметр прокатываемых труб $D=4...120$ мм, толщина стенки $S = 0,05...3$ мм.

Достоинства.

- Возможность прокатки особотонкостенных труб;
- в связи с большим коэффициентом дробности деформации можно прокатывать трубы из малопластичных сталей и сплавов (молибденовых, циркониевых, хромоникелевых);
- высокая точность и чистота поверхности труб.

Недостатки.

- Сложность оборудования и изготовления инструмента;
- еще более низкая производительность, чем станов ХПТ (20–35 м/ч).

Станы обозначаются следующим образом: например, ХПТР 15–30, где цифры соответственно минимальный и максимальный диаметр прокатываемой трубы.

При проектировании маршрутов роликовой прокатки необходимо учитывать следующие особенности. В связи с применением роликов с ручьем постоянного радиуса обжатие по наружному диаметру за проход прокатки должно составлять $\Delta D=1...4$ мм. Ограничен также зазор для ввода цилиндрической оправки:

$$\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - D_{\text{оп}} = 0,5...2,5 \text{ мм},$$

где $D_{\text{оп}}$ – диаметр цилиндрической оправки.

2.1.3. Волочение

Известны следующие традиционные способы волочения:

- безоправочное (БО);
- на короткой закрепленной оправке (КО);
- на самоустанавливающейся оправке (СО);
- на длинной оправке (ДО).

Способ волочения отличают следующие *достоинства*:

- высокая (по сравнению с холодной прокаткой) производительность – до 5 тыс. м/ч на линейных станах и до 13 тыс. м/ч на бухтовых;
- простота оборудования и инструмента (волоков и оправок);
- возможность получения труб, которые нельзя получить другими способами (капиллярные, тонкостенные малого диаметра, некоторые виды профильных труб и др.).

Недостатки.

- Невысокие коэффициенты вытяжки (в основном до 1,6) приводят к применению многопроходных схем волочения и повышению цикличности производства;
- повышенный расход металла на волочильную головку;
- характерна кривизна труб и необходима правка.

Волочильные станы обозначают следующим образом: например, ВСТ-50, где цифра – максимальное усилие волочения (здесь 50 кН).

Безоправочное волочение

Способ применяется для ускорения формирования наружного диаметра при почти постоянной толщине стенки, которая, в отличие от оправочного волочения, формируется свободно. Используется в промежуточных или окончательных проходах.

Область применения: для волочения труб из всех марок сталей и сплавов, сортамент труб также достаточно широкий. Традиционный способ БО (через одну волоку) не применяется для волочения сверхкрупных труб ($D > 120$ мм) и для волочения особотонкостенных ($D/S > 50$) и особотолстостенных ($D/S < 4$). В первом случае ограничение связано с возможной потерей устойчивости поперечного сечения трубы и образованием ужимов. Второе – с повышенной обрывностью труб при волочении.

Предельный коэффициент вытяжки $\mu_{пр}$ за один проход безоправочного волочения выбирается в зависимости от относительной тонкостенности D/S :

D/S	4...5	5...10	10...25	25...33	33...50
$\mu_{пр}$	1,2	1,33	1,5...1,7	1,3	1,1

Из приведенных данных видно, что максимальный коэффициент вытяжки 1,7 достигается при БО волочении труб нормальной тонкостенности. При волочении труб иного сортамента коэффициенты вытяжки рекомендуется снижать.

Изменение толщины стенки зависит от тонкостенности трубы, D/S , обжатия по наружному диаметру, марки материала, угла конусности волоки и др. Обычно утонение стенки стальных труб происходит при $D/S < 6$, то есть когда трубы толстостенные. При волочении тонкостенных труб ($D/S > 6$) происходит утолщение стенки. Эту закономерность отражает, например, зависимость:

$$\Delta S = 3,02(D_0 - D_T) \frac{S_0}{D_0} (0,17 - \frac{S_0}{D_0}), \quad (2.2)$$

где $\Delta S = S_T - S_0$ – изменение толщины стенки.

По зависимости (2.2) получается, что при $\frac{S_0}{D_0} > 0,17$ стенка трубы утоняется

($\Delta S < 0$), а при $\frac{S_0}{D_0} < 0,17$ стенка утолщается ($\Delta S > 0$), что иллюстрирует рис. 2.1.

В инженерных расчетах утолщение стенки можно оценить по зависимостям:

$$\text{при } S_0 \geq 1 \text{ мм } \Delta S = 0,01 \Delta D; \quad (2.3)$$

$$\text{при } S_0 < 1 \text{ мм } \Delta S = 0,005 \Delta D. \quad (2.4)$$

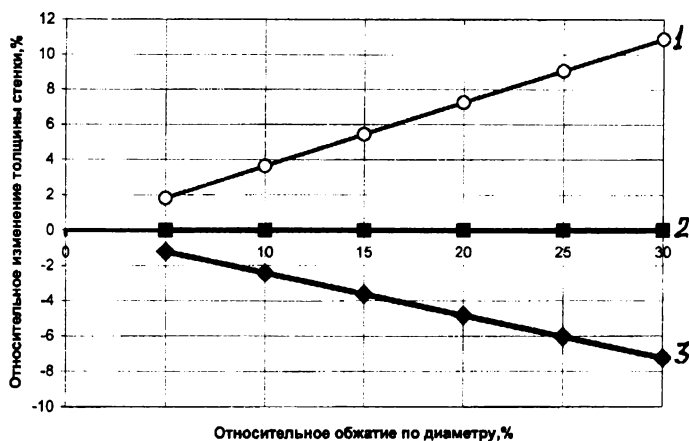


Рис. 2.1. Изменение толщины стенки при безоправочном волочении:
1 – $S/D = 0,05$; 2 – $0,17$; 3 – $0,25$

Волочение на короткой закрепленной оправке

Известны две разновидности способа: волочение на цилиндрической и цилиндро-конической (полуплавающей) оправке.

Область применения: для обжатия по наружному диаметру и толщине стенки, причем в большей степени – по диаметру. Для волочения используются линейные станы. Способ не используют для получения труб с повышенными требованиями к качеству поверхности из-за возможного налипания металла на оправку и образования рисок.

Предельный коэффициент вытяжки $\mu_{пр} = 1,8$. Обжатие по стенке невелико: $\Delta S = 0,2 \dots 0,8$ мм, соотношение коэффициентов вытяжки по стенке и диаметру $\mu_s / \mu_D = 0,8 \dots 0,9$.

Оправка крепится на стержне, на который во время волочения действует осевая растягивающая сила $Q_{ст}$. Эта сила меньше при волочении на

цилиндро-конической оправке за счет силы от нормальных давлений на коническом участке оправки, которая разгружает стержень. За счет этого уменьшается дрожание оправки, улучшается качество внутренней поверхности и повышается коэффициент вытяжки.

Волочение на самоустанавливающейся оправке

Осуществляется на короткой цилиндрико-конической оправке без стержня. Оправка самоустанавливается в очаге деформации под действием сил от напряжений трения и нормального давления.

Область применения: для обжатия по наружному диаметру и толщине стенки труб из углеродистых, легированных сталей, медных сплавов, капиллярных труб из коррозионно-стойких сталей. Для волочения используются барабанные станы. Так же, как волочение на короткой оправке, способ обычно не используют для получения труб с повышенными требованиями к качеству поверхности из-за возможного налипания металла на оправку и образования рисок.

Предельный коэффициент вытяжки $\mu_{пр} = 1,6$.

Усилие волочения меньше, чем при волочении на короткой оправке, за счет уравнивания части сил, приложенных к оправке.

Достоинства СО по сравнению с КО.

- Возможность получения труб большой длины в бухтах (до 2000 м), в том числе капиллярных;
- отсутствие удерживающего стержня и дрожания оправки;
- лучшее качество внутренней поверхности из-за гидродинамического эффекта смазки и меньших напряжений трения.

Недостатки СО по сравнению с КО.

- Не используется для вязких металлов;
- затруднена химическая обработка труб в бухтах;
- необходимы специальные смазки;

- специфические дефекты в связи с потерей устойчивости оправки: «броски» оправки, кольцевые отпечатки, обрыв трубы и др.

Волочение на длинной оправке

Способ волочения осуществляется на длинной подвижной оправке, диаметр которой равен внутреннему диаметру готовой трубы:

$$D_{\text{оп}} = D_T - 2S_T.$$

Область применения: для обжатия по толщине стенки и в меньшей степени – по наружному диаметру. Применяется обычно в начале технологического маршрута при формировании требуемой толщины стенки. Используется для изготовления тонкостенных и особотонкостенных труб из большинства марок сталей и сплавов, в том числе и склонных к налипанию на инструмент. Это связано с минимальным скольжением металла относительно оправки, которая движется вместе с трубой.

Предельный коэффициент вытяжки больше, чем при других способах волочения, за счет более благоприятной схемы напряженно-деформированного состояния: $\mu_{\text{пр}} = 2,5$.

Основная технологическая особенность способа – необходимость извлечения оправки из трубы с формированием зазора между оправкой и трубой 0,02...0,15 мм. Для формирования чаще используются обкатные устройства, работающие по принципу продольной прокатки.

Достоинства.

- Большой, чем в других способах, коэффициент вытяжки;
- лучшее качество внутренней поверхности за счет использования подвижной оправки.

Недостатки.

- Мала мобильность процесса и оборудования, ограниченность сортамента;

- большой парк инструмента, длинные оправки, большая длина стана (в 3–4 раза больше длины оправки – для зарядки, волочения и извлечения);
- требуется специальное оборудование для извлечения оправки, что снижает производительность.

Приведенные выше режимы деформации обобщены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Режимы деформации за один проход при различных способах
холодной деформации труб

Способ	Коэффициенты вытяжки $\mu_{\min} \dots \mu_{\text{пр}}$	Рекомендуемые обжатия, мм		Рекомендуемые D/S готовых труб	Зазор для ввода оправки, Δ_1 , мм
		по стенке ΔS	по диаметру ΔD		
ХПТ	2...6	1,6...8	15...40	<25	По калибровке 1...10
ХПТР	1,2...2,5	0,3...1,5	1...4	>30	0,5...2,5
БО	1,1...1,7	-	0,05...12	4...50	—
КО	1,4...1,8	0,2...0,8	3...15	10...30	0,3...5
СО	1,2...1,6	0,01...0,6	$>\Delta D_{\min}$	15...25	0,05...1,0
ДО	1,5...2,5	0,02...1,5	0,5...5	>12	0,5...5
ЛДО*	2,5...5,5	0,3...2,0	1...7	>20	0,5...5

* ЛДО – линия длинно-оправочного волочения

2.2. Химическая обработка

Химической обработке подвергаются поверхностные слои металла труб путем выдержки пакетов труб в ванне с определенным составом раствора или расплава. Режимы химической обработки являются концентрации растворов и расплавов, температура ванны и время выдержки.

После проведения операции трубы промываются горячей или холодной водой. Применение химической обработки предусматривает мероприятия по регенерации отработанных растворов и нейтрализации сточных вод.

2.2.1. Травление

Операция проводится с целью очистки труб от окалины и ржавчины, удаления поверхностного слоя. Травлению может подвергаться как исходная заготовка, так и труба на промежуточных стадиях изготовления после проведения термической обработки (удаления окалины) и длительного хранения. В зависимости от материала и размеров труб применяют следующие виды травления.

Кислотное травление проводят в растворах серной (H_2SO_4), соляной (HCl), фосфорной (H_3PO_4), смеси плавиковой (HF) и азотной (HNO_3) кислот. Применяется чаще всего для труб из углеродистых, низколегированных сталей и сплавов на основе меди.

Окалина и ржавчина на поверхности стальных труб состоят из окислов железа (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) и окислов легирующих элементов, например NiO , Cr_2O_3 и др.

Для их удаления проводят химическую реакцию:



В результате химического взаимодействия окислов с кислотами образуются соли, растворимые в воде. Концентрация кислоты в водном растворе составляет 10–25%; температура нагрева 25–70⁰С; продолжительность травления 15–120 мин.

При травлении в соляной кислоте скорость травления в 1,5–2 раза выше, чем в серной, но транспортировка такой кислоты затруднительна.

При травлении в фосфорной кислоте металл меньше разъедается и обеспечивается лучшее качество поверхности, однако возникают трудности в регенерации кислоты.

Щелочно-кислотное травление применяется для травления труб из высоколегированных и коррозионно-стойких сталей и сплавов на основе титана, хрома, никеля и др. Эти сплавы образуют труднорастворимые окислы, которые невозможно растворить при кислотном травлении.

Травление производится в две стадии.

1. В щелочном расплаве состава:

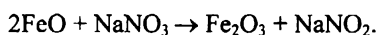
натриевая селитра NaNO_3 – 20–30%;

щелочь NaOH – 65–75%;

хлористый натрий NaCl – 3–5%.

Температура нагрева 400–500⁰С; продолжительность травления 20–60 мин.

Смысл химических реакций состоит в том, что NaNO_3 доокисливает окислы окарины и переводит их из низших в высшие. Например,



При этом происходят объемные и структурные изменения в окарине и она часто разрушается. Высшие окислы становятся растворимыми в кислотах, и проводится вторая стадия.

2. В кислотном растворе состава:

плавиковая кислота HF – 2–4%;

азотная кислота HNO_3 – 8–12%.

Температура нагрева 30–40⁰С; продолжительность травления 5–80 мин.

Щелочное травление используется в случаях, когда для удаления окарины оказывается достаточно первой стадии травления в щелочном расплаве.

Известны и другие, менее распространенные способы травления: гидридное (с помощью гидрида натрия NaNH), травление газом, ультразвуковое, струйно-циркуляционное. Для повышения интенсивности травления используют предварительный нагрев, вибрацию и др.

2.2.2. Активирование

Заключается в подготовке поверхности труб из нержавеющей марок сталей после травления для последующего нанесения медного подмазочного покрытия. Сложность нанесения медного покрытия обусловлена наличием на поверхности труб окисной пассивной пленки, состоящей из окислов хрома, никеля и титана, затрудняющих процесс растворения металла.

Активирование проводят в кислотном растворе состава:

серная кислота H_2SO_4 – 18–22%;

хлористый натрий NaCl – 1–3%.

Температура нагрева 50–70⁰С; продолжительность обработки 5–15 мин.

2.2.3. Подмазочные покрытия

Для получения качественной поверхности труб необходимо так изменить условия на границе металл–инструмент, чтобы работа сил трения была сосредоточена в поверхностном слое вне основного металла. Это может быть достигнуто путем нанесения на поверхность деформируемого металла тонкого слоя покрытия, прочно связанного с основой и способного выдержать без больших разрушений дополнительную деформацию.

Меднение заключается в покрытии труб тонким слоем меди толщиной 2–4 мкм. Применяется контактный электрохимический способ.

Для меднения труб из углеродистых сталей рекомендуется раствор состава:

серная кислота H_2SO_4 – 4–10%;

медный купорос $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 15 г/л;

ПАВ (поверхностно-активные вещества) – 3–10 г/л.

Температура раствора 30–50⁰С; продолжительность обработки 3–5 мин.

Для меднения труб из нержавеющей сталей рекомендуется раствор состава:

серная кислота H_2SO_4 – 24–28%;

хлористый натрий NaCl – 0,5–1,5%;

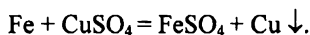
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 3–10 г/л;

$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 20–100 г/л;

ПАВ (поверхностно-активные вещества) – 0,5–2 г/л.

Температура раствора 60–75⁰ С; продолжительность обработки 15–20 минут.

С целью повышения скорости контактного обмена применяется электролит с повышенным содержанием кислоты и добавкой хлористого натрия. В результате химической реакции железо с поверхности труб переходит в раствор FeSO_4 , а медь осаждается на поверхности труб:



Фосфатирование заключается в покрытии труб пленкой, состоящей из фосфатов цинка и железа. Применяется для труб из углеродистых и легированных сталей. Фосфатное покрытие более прочное, чем медное.

Проводится в растворе, %:

цинковые белила ZnO – 0,9–1,5;

фосфорная кислота H_3PO_4 – 0,8 ;

азотная кислота HNO_3 – 1,2–1,8.

Температура раствора 50–70⁰С; продолжительность обработки 7–10 мин.

Фосфатирование связано с гидролизом солей, который особенно интенсивно протекает при нагревании раствора. Для цинка и железа гидролиз протекает по схеме



где *Me* обозначает Zn либо Fe .

Покрытие образовано фосфатами $\text{Me}_3(\text{PO}_4)_2$.

Оксалатирование – покрытие поверхности труб оксалатом железа FeC_2O_4 , рекомендуется применять при волочении нержавеющей труб.

Обработка проводится в растворе состава, г/л:

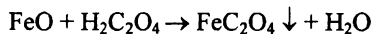
щавелевая кислота $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 24;

железо шавелевокислое закисное $\text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – 12;

двуххромовокислый калий $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ – 6;

хлористый натрий NaCl – 160–200.

Наряду с электрохимическими процессами происходит химическая реакция с выпадением оксалатов железа:



По данным [3], оксалатное покрытие более чем в 3 раза дороже, чем медное и фосфатное, и отличается большей прочностью.

2.2.3. Технологические смазки

Смазки применяются с целью снижения сил трения на контактных поверхностях, уменьшения налипания металла на инструмент, повышения качества поверхности труб и износостойкости инструмента, снижения расхода энергии на деформацию и усилий деформирования.

Смазки должны удовлетворять следующим требованиям:

- иметь высокие смазочные свойства, жидкотекучесть в сочетании с высокой вязкостью;
- стабильность состава и свойств в процессе деформации;
- отсутствие корродирующего действия на металл и инструмент;
- отсутствие в смазке вредных веществ;
- легкость последующего обезжиривания;
- легкость регенерации и утилизации отходов;
- относительная дешевизна и доступность компонентов.

Универсальных смазок нет. Выбор смазки определяется маркой стали или сплава и размерами деформируемой трубы, способом прокатки или волочения, режимами деформации.

При холодной прокатке труб из углеродистых и низколегированных сталей используют различные смазки, подающиеся внутрь трубы [4]:

- на основе касторового (хлопкового) масла, омыленных синтетических жирных кислот (СЖК) или осерненного касторового масла; все смазки применяют с различными наполнителями, например тальком. Их наносят на медные или фосфатные подсмазочные покрытия;

- солидол (для крупных станов ХПТ-250 и ХПТ-450) с предварительным фосфатированием поверхности.

В качестве наружных смазок часто применяют смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) – 4–7%-ные водные растворы натурального хозяйственного или синтетического мыла, эмульсии на основе синтетических материалов фракций C_{20} и выше с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ).

При холодной прокатке труб из высоколегированных сталей используют следующие смазки:

- на основе касторового (хлопкового) масла с наполнителями после предварительного меднения поверхности. Эта смазка с предварительным оксалатированием поверхности используется на станах ХПТР с валковой клетью;

- на основе касторового (хлопкового) масла с окисью цинка или на основе хлорпарафина с окисью цинка и добавлением триэтаноламина и ПАВ после предварительного меднения поверхности или без него, применяется на станах ХПТР;

- на основе хлорпарафина и омыленных СЖК с добавками (триэтаноламин, окись цинка и гидроокись бария) без подсмазочного покрытия, используется на станах ХПТР;

- солевую эвтектику с добавкой водорастворимого полимера (ВРП) с предварительным меднением поверхности или без него – на станах ХПТ-250 и ХПТ-450.

При холодной прокатке труб из высоколегированных сталей смазки наносятся на внутреннюю и наружную поверхности труб без применения СОЖ, так как СОЖ не предохраняет поверхность от налипания и смывает смазку с наружной поверхности.

Для прокатки труб из труднодеформируемых сплавов разработаны смазки на основе минеральных масел, на основе продуктов переработки отходов производства себаценовой кислоты.

При теплой прокатке труб используют селитрово-графитовые ($\text{NaNO}_3 + \text{C}$) и известков-графитовые смазки. Причем графит используется в малых количествах (3–5%), чтобы исключить межкристаллитную коррозию. Применение графита приводит к загрязнению оборудования и помещений, сложной и энергоемкой очистке труб, поэтому ведутся поиски технологий теплой прокатки на безграфитной смазке. Например, применяется СОЖ, состоящая из 45–65% хлорпарафина и индустриального масла. Также в качестве безграфитной смазки применяются солевые смазки с добавлением водорастворимых полимеров, которые не выдавливаются из очага деформации, а равномерно смачивают трущиеся поверхности. Такая смазка не требует специального обезжиривания в щелочном расплаве, а ее остатки легко снимаются в обезжиривающем растворе или горячей воде [5].

При холодном волочении труб наиболее распространены сухие смазки – мыло или мылоподобные вещества с разной жировой и металлической основой, которые наносят на подсмазочные покрытия.

Смазки перед оправочным волочением наносят на трубы окунанием в водные растворы (эмульсии, суспензии) и затем сушат. При этом плохо высушенные смазки не проявляют достаточных смазочных свойств. Перед безоправочным волочением смазки наносят на наружную поверхность поливом, иногда непосредственно на стане.

Смазки для мокрого волочения (жидкие смазки) обычно обеспечивают лишь тонкую граничную пленку и находят применение в отдельных случаях. Применяются хлорпарафин и смазки на основе сложных эфиров и мыл.

Идет разработка составов самовозгоняющихся смазок, например, на основе олеиновой кислоты $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$. При нагреве эти смазки разлагаются с образованием легких газообразных продуктов, не загрязняя атмосферу печи. При использовании таких смазок операцию обезжиривания не проводят.

2.2.4. Обезжиривание

Операция заключается в очистке химическим способом поверхности труб от остатков смазки перед термической обработкой. Применяется после холодной деформации с использованием смазки. Состав ванны определяется материалом труб и видом смазки.

Необходимость удаления смазки обусловлена наличием в составе многих смазок углерода, который при дальнейшей термической обработке может вызвать науглероживание поверхности. Кроме того, сгорание и термодиссоциация смазки загрязняют атмосферу печи и нарушают нормальный режим ее работы.

Рассмотрим основные составы ванн для проведения обезжиривания.

1. Горячая вода, нагретая до температуры выше 70°C , используется для удаления смазки на основе мыльного порошка. Время промывки 10–20 мин.

2. Щелочной раствор применяют для удаления смазок-эмульсий на основе мыл и касторового масла, а также хлорпарафина. Состав раствора:

щелочь NaOH – 60–70 г/л;

жидкое стекло Na_2SiO_3 – 50–70 г/л;

соль Na_3PO_4 – 50–70 г/л.

Температура нагрева до 100°C ; продолжительность обработки 15–90 мин.

3. Щелочной расплав применяют для удаления графитосодержащих смазок после теплой прокатки на станах ХПТ. Состав расплава:

натриевая селитра NaNO_3 – 80%;

щелочь NaOH – 20%.

Температура нагрева $380\text{--}450^{\circ}\text{C}$; продолжительность обработки 20–25 мин.

4. Комбинированное обезжиривание применяется для очистки труб из коррозионно-стойких сталей. Обезжиривание проводится в две стадии:

- обработка в щелочной среде составов 2 или 3;
- обработка в растворе кислот, аналогичном применяемому во второй стадии щелочно-кислотного травления.

При использовании самовозгоняющихся смазок, например, на основе олеиновой кислоты ($C_{18}H_{34}O_2$), операцию обезжиривания можно исключить. При нагреве такие смазки разлагаются с образованием легких газообразных продуктов.

2.2.5. Электрохимическое и химическое полирование

Процесс электрохимического полирования металлов заключается в анодном растворении микровыступов поверхности в электролите с наложением постоянного тока. Применяют электролиты на основе хлорной и уксусной кислот, фосфорной и серной кислот.

Химическое полирование (без наложения внешнего тока) производится для труб из нержавеющей стали, но довольно редко. Процесс представляет собой сглаживание поверхности в результате преимущественного растворения микровыступов в специальных растворах. Наиболее часто используется раствор на основе серной, соляной и азотной кислот с добавкой в качестве блескообразователя кислотного красителя.

Технологический процесс химического полирования состоит из следующих операций: обезжиривания, промывки в горячей и холодной воде, декапирования в 15–20% HCl , промывки, нейтрализации остатков кислот в 5–10% содовом растворе, промывки, сушки.

2.2.6. Пассивация и консервация

Для защиты труб от атмосферной коррозии между операциями применяется пассивация, а для защиты готовых труб при транспортировке к заказчику – консервация.

Пассивация – это межоперационная защита труб от коррозии, которая в цехе обусловлена наличием влаги, пыли, газов.

Наиболее распространенными веществами для защиты являются неорганические водорастворимые ингибиторы: нитриты, фосфаты, хроматы, силикаты с добавлением ПАВ. Используется, например, раствор следующего состава:

тринатрийфосфат Na_3PO_4 – 7%;

сульфонол – 16%.

В результате обработки на поверхности труб образуется тонкая окисная пленка.

Консервация заключается в поверхностном покрытии труб для длительного предохранения от атмосферной коррозии.

Самое широкое распространение получили консистентные смазки: пушечная, солидолы, технический вазелин, машинное масло, загущенное пушечной смазкой, и др. Эти смазки надежно защищают металл, дешевы, просты в применении, однако возникают большие трудности при удалении их с внутренней поверхности труб. Кроме того, применение этих смазок придает продукции нетоварный вид. Для улучшения защитных свойств смазок вводят ингибиторные добавки с целью образования на поверхности металла прочной адсорбционной пленки.

Применяют также различные лакокрасочные покрытия, эмали и стеклянные покрытия.

2.3. Термическая обработка

Термическая обработка труб заключается в нагреве, выдержке и охлаждении с определенной скоростью для снятия наклепа и остаточных напряжений, восстановления пластических свойств и формирования заданных свойств и структуры металла.

Для характеристики структуры стали, формирующейся при термической обработке, рассмотрим фрагмент диаграммы железо–углерод (рис. 2.2).

На диаграмме приняты следующие обозначения.

Ж – жидкая фаза; А – *аустенит* – твердый раствор углерода в γ -железе, имеющем кубическую гранецентрированную (ГЦК) решетку; Φ – *феррит* – твердый раствор углерода в α -железе, имеющем кубическую объемноцентрированную (ОЦК) решетку; Ц – *цементит* – химическое соединение железа с углеродом, карбид железа Fe_3C ; П = $\Phi + \text{Ц}$ – *перлит* – механическая смесь феррита и цементита.

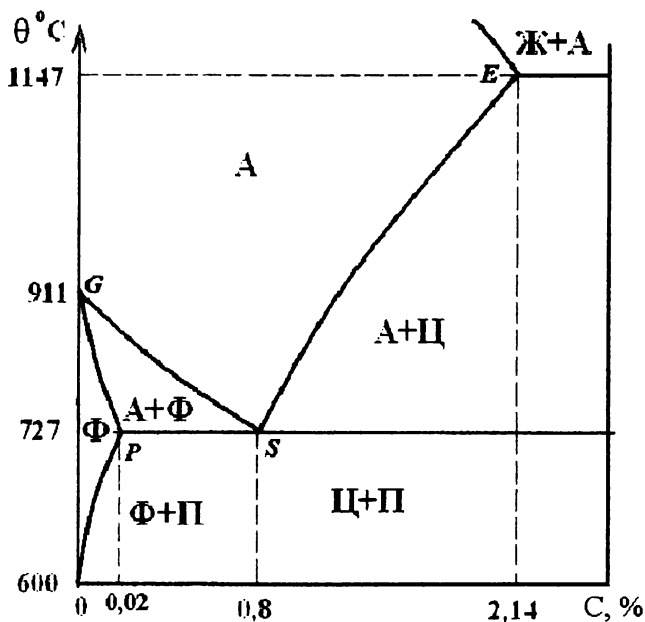


Рис. 2.2. Фрагмент диаграммы железо–углерод

Точка P показывает предельную растворимость углерода в α -железе (0,02%) при температуре 727°C . Критические точки, образующие линию GS при нагреве, обозначаются A_{c3} и соответствуют превращению $A \leftrightarrow \Phi$. Линия PS и ее продолжение (727°C) соответствует эфтектоидному превращению ($A \leftrightarrow \text{П}$) и при нагреве обозначается A_{c1} . Линия ES показывает изменение растворимости углерода в аустените с изменением температуры и при

охлаждении соответствует температурам начала распада аустенита с выделением из него цементита. Предельная концентрация углерода в аустените – 2,14% (точка E).

Основные характеристики железоуглеродистых сплавов следующие.

Техническое железо содержит не более 0,02% углерода (C). Стали – сплавы железа с углеродом, содержащие до 2,14% C. В доэфектоидных сталях содержится углерода до 0,8% (точка S), в эфектоидных – 0,8%, в заэфектоидных – более 0,8%.

Чугуны – сплавы железа с углеродом, содержащие более 2,14% C.

Режимы основных видов термической обработки схематично представлены на рис. 2.3.

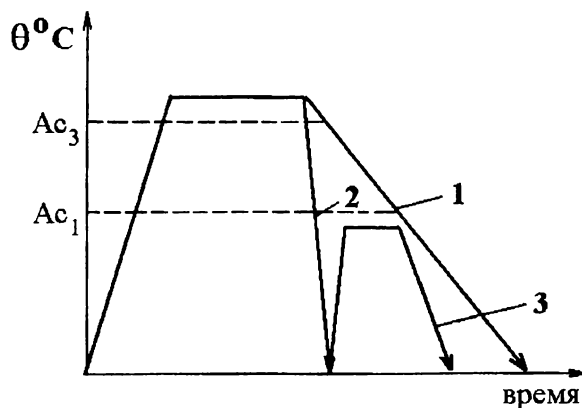


Рис. 2.3. Основные виды термообработки:
1 – отжиг; 2 – закалка; 3 – отпуск

Нагрев металла производится в проходных или камерных печах с газовым или электрическим нагревом, используются также аппараты электроконтактного и индукционного нагрева.

В зависимости от требований к качеству поверхности и химического состава металла термообработка может проводиться на воздухе, в атмосфере

печи (в пламени, в безокислительных и восстановительных защитных атмосферах).

Применяются следующие виды термообработки.

Рекристаллизационный отжиг проводится между проходами холодной деформации с целью повышения пластичности, снижения сопротивления деформации металла (наклепа) и остаточных напряжений.

Режим отжига: нагрев до температуры выше температуры рекристаллизации, $\theta_n = \theta_{\text{рекр}} + (30 \dots 50)^\circ\text{C}$, выдержка и медленное охлаждение.

Температура рекристаллизации $\theta_{\text{рекр}} = (0,4 - 0,6)\theta_{\text{пл}}$ °К, где $\theta_{\text{пл}}$ °К – температура плавления металла или сплава в кельвинах; коэффициент 0,4 соответствует чистым металлам, а 0,6 – сплавам. Связь между значениями температуры по шкале Кельвина ($\theta^\circ\text{K}$) и шкале Цельсия имеет вид: $\theta^\circ\text{K} = \theta^\circ\text{C} + 273,15^\circ\text{C}$.

Горячая деформация производится при температуре металла, равной температуре его рекристаллизации или выше. Если температура обрабатываемого металла ниже температуры рекристаллизации, то такая деформация называется *холодной*.

При такой температуре нагрева в металле происходят диффузионные процессы, связанные с образованием новых глобулярных зерен взамен деформированных, вытянутых. При этом снижается плотность дислокаций.

Например, отжиг углеродистых сталей, содержащих 0,08–0,2% С, проводят при $\theta_n = 680 - 700^\circ\text{C}$, а высокоуглеродистых хромистых сталей – при $\theta_n = 730^\circ\text{C}$ в течение 0,5–1,5 ч.

Нормализационный отжиг (нормализация). Этому виду термообработки подвергается горячекатаная трубная заготовка перед холодной деформацией. Обязательно проводится для заготовок из хромистых сталей (например, ШХ 15). Для углеродистых и низколегированных сталей необязательна.

Цель нормализации – улучшение структуры, измельчение зерна, завершение фазовых превращений после горячей деформации, восстановление прочностных и пластических свойств.

Режим нормализации: нагрев до температуры $\theta_n = A_{c3} + 50^\circ\text{C}$ (выше линии GS на рис. 2.2), небольшая выдержка и ускоренное охлаждение на воздухе или водовоздушным спреером.

При этой температуре происходит растворение избыточных фаз, оставшихся после горячей деформации, например, карбидной сетки для углеродистых и малолегированных сталей.

После охлаждения металл имеет, в зависимости от содержания углерода, феррито-перлитную или цементито-перлитную мелкозернистую структуру, что повышает прочностные и пластические свойства.

Закалка проводится для формирования заданных свойств готовых труб.

Режим закалки: нагрев до температуры $\theta_n = A_{c3} + 30 \dots 50^\circ\text{C}$ (выше линии GS на рис. 2.2), выдержка и охлаждение – со скоростью выше критической (в воде или масле).

При нагреве до указанной температуры сталь имеет аустенитную структуру, которая при последующем охлаждении с высокой скоростью превращается в мартенсит (перенасыщенный раствор внедрения углерода в α -железе).

В результате закалки повышается твердость стали за счет образования игольчатых кристаллов мартенсита. С повышением содержания углерода в мартенсите растет его твердость. При концентрации $C > 0,3\%$ мартенсит малопластичен, а при $C \approx 0,03\%$ он называется безуглеродистым и обладает высокой пластичностью и низкой твердостью.

Наряду с формированием заданных свойств при закалке в стали возникают внутренние напряжения, связанные с неравномерностью охлаждения разных слоев, увеличением объема и неоднородностью протекания мартенситного превращения.

Для устранения этих напряжений применяют сопутствующую термообработку – отпуск.

Отпуск применяется после закалки и является окончательной операцией термообработки. Цель отпуска – снятие внутренних напряжений и получение требуемых механических свойств.

Режим отпуска: нагрев до температуры $\theta_n < A_{c1} = 727^{\circ}\text{C}$ (ниже линии *PS* на рис. 2.2), выдержка и медленное охлаждение.

Трубы чаще всего подвергают высокотемпературному (высокому) отпуску при $\theta_n = 500 \dots 680^{\circ}\text{C}$.

При этой температуре происходят частичный распад аустенита, уменьшение объема, снятие закалочных напряжений, повышение упругих свойств, ударной вязкости при сохранении высокого уровня прочностных свойств. И чем медленнее охлаждение, тем эффективнее снижаются остаточные напряжения.

Закалку с последующим высоким отпуском называют улучшением.

2.4. Механическая обработка

Операции механической обработки включают правку, разрезку, ремонт, забивку волочильных головок.

Правка проводится для устранения искажений формы трубы в продольном (кривизна), поперечном (овальность) сечениях, а также для ликвидации скручивания профильных труб.

Искажения возникают при волочении, термообработке и травлении труб. Причины искажений – появление остаточных или закалочных напряжений из-за неравномерного деформационного или температурного режимов обработки.

Применяют следующие виды правки:

- предварительная; обеспечивает кривизну трубы не более 3–5 мм/м и осуществляется на кривошипных или эксцентриковых прессах, роlikоправильных машинах, производится плоский изгиб;
- окончательная; обеспечивает кривизну трубы не более 1–1,5 мм/м и осуществляется на косовалковых правильных машинах, в машине с вращающейся роlikовой обоймой или изогнутой трубкой для тонкостенных и особотонкостенных труб, в том числе капиллярных, производится многократный изгиб в разных плоскостях;
- растяжение (термоправка); проводится одновременно с нагревом трубы в печи, индукторе или электроконтактным способом – для профильных и толстостенных труб;
- правка, совмещенная с обкаткой для труб после длиннооправочного волочения, проводится на обкатных станах.

Разрезка производится для подготовки концов труб к дальнейшей обработке или сдаче. Путем разрезки выполняются операции разделения труб на части, отрезка концов, вырезка дефектных мест, отбор образцов, торцовка (снятие заусенцев и фасок). Все операции разрезки должны обеспечивать перпендикулярность торцов оси трубы, отсутствие наплывов, заусенцев, смятия профиля. Разрезка выполняется резцовыми, фрезерными и дисковыми (с абразивным и металлическим кругом) головками при неподвижной или вращающейся трубе.

Ремонт предназначен для удаления поверхностных дефектов с труб и включает обточку, расточку, шлифовку и полировку. Обточку наружной поверхности и расточку внутренней поверхности заготовки применяют при изготовлении труб ответственного назначения (особотонкостенных, капиллярных, безрисочных, электрополированных и т. п.). При расточке и обточке удаляется слой металла толщиной 0,5...1 мм с каждой стороны, что считается гарантией отсутствия поверхностных дефектов (безуглеродистого слоя, мелких трещин, рисок, плен). Мелкие поверхностные дефекты заготовки удаляются шлифовкой.

Дефекты с поверхности труб промежуточных и готовых размеров удаляют наружной шлифовкой (на бесцентрово-шлифовальных станках), внутренней (на ленточных, внутришлифовальных станках), опескоструиванием и электрополировкой.

Забивка головок необходима для подачи трубы в волоку и приложения усилия волочения. Поперечный размер головки должен быть меньше диаметра готовой трубы. При забивке конец трубы сплющивается до соприкосновения стенок, а затем закатывается. Переход от забитого конца к телу трубы должен быть плавным, без резких выступов и ребер. Ось забитого конца должна совпадать с осью трубы. Для того чтобы не забивать головку перед каждым проходом волочения, увеличивают разницу между диаметрами головки и заготовки.

Применяют следующие способы подготовки головок:

- ротационное обжатие на радиально-ковочных машинах – для тонкостенных труб;
- заковка штампами на пневмомолоте или гидравлическом прессе – для толстостенных труб;
- вальцовка на ковочных вальцах;
- проталкивание переднего конца трубы во вспомогательную матрицу – перед длиннооправочным волочением.

3. Разработка технологии изготовления труб

Последовательность операций технологического цикла по изготовлению холоднодеформированных труб называют маршрутом. Маршрут выбирается в зависимости от сортамента труб, технических требований к ним с учетом нормативных документов, парка оборудования в цехе и др.

Маршрут должен быть разработан рационально для обеспечения получения труб заданного качества с минимальными затратами.

Технология изготовления труб (формирование маршрута) разрабатывается в следующем порядке:

- 1) выбирается рациональная схема производства;
- 2) выбираются тип и размеры исходной заготовки;
- 3) предварительно рассчитываются размеры трубы после каждого прохода деформации;
- 4) назначаются необходимые вспомогательные операции и их режимы;
- 5) рассчитываются потери металла на вспомогательных операциях и расходный коэффициент;
- 6) составляется технологическая карта.

Рассмотрим этапы разработки технологии.

3.1. Выбор схемы производства

Схема производства – это последовательность операций холодной деформации (ХПТ, ХПТР, волочение) для изготовления труб заданного размера и качества. Схема производства выбирается в зависимости от сортамента труб, технических требований к ним, наличия и возможности приобретения различных видов исходной заготовки, имеющегося парка оборудования и его загрузки. Типичные схемы производства, сложившиеся на заводах, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Типичные схемы производства

Обозначение схемы	Последовательность операций
А	ХПТ-БО
Б	КО-БО; БО
В	ХПТ-КО-БО; КО-ХПТ-БО
Г	ХПТ-ХПТР-БО; ХПТ-БО-ХПТР
Д	ХПТ-КО-БО-ХПТР; КО-ХПТ-ХПТР-БО
Е	ХПТ-СО-БО; СО-БО
Ж	ХПТ-ДО(ЛДО)-БО; КО-ХПТ-ДО(ЛДО)-БО
З	ДО(ЛДО)-КО-БО; КО-ДО(ЛДО)-БО

Для удобства ссылок на табл. 3.1 схемы обозначены буквами. В перечисленных схемах каждый способ деформации может применяться несколько раз, то есть может быть многопроходным. Так, ХПТ может содержать до 3 проходов, ХПТР – до 5 проходов; КО и ДО волочение – до 3 проходов; СО и БО волочение – до 5 проходов и более. Схемы производства, в зависимости от числа проходов и сложности вспомогательных операций, иногда разделяют на простые (А, Б), комбинированные (В, Е, З) и сложные (Г, Д, Ж). Сложные схемы применяются для изготовления труб ответственного назначения и могут включать более 10 проходов деформации, сложные виды вспомогательных операций и отличаются большим расходным коэффициентом металла.

При выборе схем производства можно пользоваться данными табл. 3.2, где в зависимости от сортамента готовых труб и технических требований к ним рекомендованы определенные схемы производства из табл. 3.1. Окончательный выбор схемы производства проводится исходя из конкретных производственных условий и перечисленных ниже рекомендаций.

Таблица 3.2

Рекомендуемые схемы производства холоднодеформированных труб различного сортамента, мм [2]

Марки сталей и сплавов	Требования по качеству	S = 0,1 ... 1,0			S = 1,0 ... 3,5			S = 3,5 ... 10		
		D≤18	D=20...40	D=42...80	D≤18	D=20...40	D=42...80	D≤18	D=20...40	D=42...80
Углеродистые, низколегированные, легированные	Общего назначения	Г,Д,Ж	Г,Ж	Г	В,З	Б,В,З	Б	А,Б,Е	Б,Е	Б
	Безрисочные	Г,Ж	Г,Ж	Г	Г	Г	Г	-	-	-
	С калиброванным внутренним каналом	Г,Е	Г	Г	Е	Б,В,Е	Б,Е	Е	Б,Е	Б,Е
Высоколегированные (коррозионно-стойкие, жаропрочные, жаростойкие)	Общего назначения и электрополированные	Г	Г	Г	А	А,Г	А,Г	А	А	А
Сплавы на основе титана, ниобия, циркония	Повышенного качества	А,Г	Г	Г	А	А,Г	А,Г	А	А	А
Труднопрошаиваемые стали и сплавы на основе никеля и др.	Повышенного качества	Г,Ж	Г,Ж	Г,Ж	А,Ж	А,Г	А,Г	А	А	А
Сплавы на основе меди (латуни, бронзы, медноникелевые)	Общего и специального назначения	Е,Ж,З	Ж,З	Г,Ж,З	Е,З	Е,З	Б,Г	-	-	-

Общие рекомендации по выбору схем производства:

- 1) первые проходы деформации должны быть оправочными (чаще ХПТ, КО) для получения заданной толщины стенки;
- 2) в заключительных проходах обычно формируют наружный диаметр, поэтому используют волочение без оправки (БО);
- 3) безоправочное волочение можно по необходимости исключать из рекомендованных в табл. 3.1 схем;
- 4) способ ХПТР как наименее производительный использовать только для прокатки особотонкостенных труб специальных видов;
- 5) однопроходные маршруты применять нецелесообразно, так как не удастся устранить повышенную разностенность горячекатаной или прессованной заготовки. При применении сварной заготовки одного прохода также недостаточно для проработки зоны сварного шва;
- 6) не следует применять чередование способов деформации, так как это усложняет цеховые грузопотоки (например, КО-ХПТ-КО).

3.2. Выбор исходной заготовки

Исходной заготовкой для изготовления холоднодеформированных труб служат горячекатаные, горячепрессованные и электросварные трубы. При изготовлении труб специального назначения могут использоваться центробежнолитые и сверленные заготовки.

Наибольшее распространение получила горячекатаная заготовка, полученная на ТПА (трубопрокатном агрегате) с непрерывным, автоматическим и трехвалковым раскатным станом. Рассмотрим достоинства и недостатки заготовок.

Заготовка после ТПА с непрерывным станом

Достоинства: высокое качество наружной и внутренней поверхности, малые размеры (D до 32 ... 25 мм, S – до 2,5...3 мм) за счет применения редуцирования с натяжением, $D/S = 7...25$.

Недостатки: повышенная продольная разностенность в результате образования утолщенных концов при редуцировании с натяжением.

Рекомендации по применению: для изготовления тонкостенных и особотонкостенных труб в схемах, где первый проход осуществляется на станах ХПТ или на длиннооправочном волочильном стане для снижения продольной разностенности.

Заготовка после ТПА с автоматическим станом

Достоинства: универсальность сортамента как по маркам сталей, так и по размерам ($D/S = 4...35$), может использоваться для изготовления особотолстостенных и особотонкостенных труб.

Недостатки: низкое качество внутренней поверхности (риски, плены) и повышенная поперечная разностенность, связанные с раскаткой на короткой удерживаемой оправке.

Рекомендации по применению: используют при изготовлении всех видов труб, но для снижения разностенности применяют не менее двух оправочных проходов. При изготовлении труб с повышенными требованиями к качеству поверхности заготовку обычно подвергают обточке и расточке в начале технологического цикла.

Заготовка после ТПА с трехвалковым раскатным станом

Достоинства: высокая точность и хорошее качество наружной и внутренней поверхности.

Заготовка имеет высокую толстостенность – $D/S = 4...11$, поэтому ее рекомендуется применять для изготовления толстостенных труб за 1–2 прохода ХПТ, реже – с применением волочения.

Горячепрессованная заготовка

Достоинства: сравнительно небольшие размеры (D до 20...25 мм, S до 1,7...2 мм), возможность получения труб из малопластичных и труднодеформируемых сталей и сплавов при удовлетворительном качестве поверхности.

Недостатки: высокий расходный коэффициент металла в связи с наличием пресс-остатка, низкая производительность трубопрессовых установок, низкая стойкость инструмента, большая себестоимость заготовок, высокая поперечная эксцентричная разностенность.

Рекомендации по применению: для изготовления труб из труднодеформируемых сталей и сплавов, а также цветных металлов и сплавов (медных, титановых, циркониевых и др.).

Электросварная заготовка

Достоинства по сравнению с бесшовной заготовкой:

- лучшее качество поверхности, меньше поверхностных дефектов;
- практически отсутствует поперечная разностенность (более высокая точность);
- меньшие размеры, максимально приближенные к размерам готовой трубы.

Недостатки:

- наличие внутреннего грата и сварного шва;
- пониженная пластичность металла в области сварного шва из-за неблагоприятной структуры.

Рекомендации по применению:

- при выборе режимов деформации коэффициенты вытяжки снижают на 15...20% по сравнению с режимами обжатий бесшовных заготовок;

- рекомендуемый способ деформации – оправочное волочение; при холодной прокатке и безоправочном волочении возможно возникновение схем растягивающих напряжений и растрескивания в области сварного шва;
- рекомендуемое количество проходов холодной деформации – не менее двух для проработки структуры сварного шва.

Общие рекомендации по выбору заготовки

Размеры исходной заготовки должны быть максимально приближены к размерам готовой трубы, что позволяет уменьшить число проходов.

Величина деформации должна обеспечивать требуемое качество труб по точности, качеству поверхности, структуре, механическим и другим свойствам.

Наружный диаметр исходной заготовки обычно унифицирован и выбирается из следующего ряда, мм:

146, 140, 127, 114, 102, 89, 83, 74, 68, 63, 57, 45, 38, 35, 32, 30, 28, 25.

Толщина стенки выбирается с точностью до 0,1 мм.

Длина исходной заготовки обычно составляет $L_0 = 5 \dots 6$ м.

За неимением производственных данных можно использовать табл. 3.3.

Таблица 3.3

Размеры заготовки для изготовления холоднодеформированных труб DxS, мм [2]

Марка стали, сплава	Горячекатаная			Горячепрессованная		Электросварная	
	ТПА с 3-х валковым раскатным станом	ТПА с автоматическим станом	ТПА с непрерывным станом	ТПА с зонтовым прессом	ТПА с вертикальным прессом	сварка или титвением	ТВЧ газо-электрическая сварка
Углеродистые, низколегированные, легированные стали	(68-83)х (6-12); (83-120)х (7-20); (120-170)х (11-30)	(57-83)х (3,5 - 9); (83-146)х (1-25); (146-219)х (6-50)	(32-57)х (3-5); (57-83)х (3,5-6); (83-102)х (4-6)	-	(25-42)х (2,5-3); (42-63)х (3-6)	(1-18)х (0,1-2); (18-50)х (2-4); (50-76)х (3-4); (76-152)х (3-5,5)	-
Высоколегированные (коррозионно-стойкие, жаропрочные, жаростойкие) стали	-	(83-102)х (7-16); (108-168)х (8-20)	-	(57-76)х (4-8); (76-96)х (5-12); (96-152)х (6-25)	-	-	(6-20)х (0,5-1,5); (20-30)х (1,5-2); (32-57)х (2,5-3,5); (57-89)х (3-4)
Сплавы на основе меди (латуни, бронзы)	-	-	-	(40-75)х (3-10)	(21-34)х (1,7-4)	-	(6-20)х (0,5-1)
Сплавы на основе титана, циркония	(83-102)х (8-12); (102-168)х (8-20)	-	-	(20-40)х (2-4); (40-63)х (4-10); (63-96)х (6-15); (95-159)х (8-15)	-	-	(6-20)х (0,5-1,5); (20-30)х (1,5-2); (32-57)х (2,5-4)

3.3. Расчет размеров труб по проходам

Для расчета исходной является следующая информация: схема производства, исходные и конечные размеры труб при данном способе деформации, рекомендуемые режимы обжатий (см. табл. 2.3).

Рассчитываются число проходов данного способа деформации и размеры труб после каждого прохода.

При определении наружного диаметра D_i учитывают парк калибров, роликов и волок в цехе. Расчетный диаметр округляют в сторону увеличения или уменьшения до имеющегося размера. Только при изготовлении труб специального назначения и уникальных изготавливают инструмент под данный размер. При отсутствии этих данных рекомендуется использовать следующие ряды размеров инструмента:

Выходной диаметр калибров станов ХПТ, мм:

89, 83, 76, 72, 63, 57, 55, 52, 48, 45, 42, 40, 38, 35, 32, 28, 25, 22, 20, 18.

Выходной диаметр рабочего канала волокна:

63, 60, 57, 52, 48, 45, 42, 40, 38, 36 и далее через 1 мм.

3.3.1. Расчет размеров труб по проходам при деформации на оправке

Исходные данные: способ деформации – ХПТ, ХПТР, КО, СО, ДО; размеры трубы перед деформацией данным способом, D_0 , S_0 , и после нее D_n , S_n .

Определить: число проходов n , размеры трубы после каждого прохода D_i , S_i .

Последовательность расчета.

1. Определяются суммарные коэффициенты вытяжки: по стенке –

$$\mu_s = \frac{S_0}{S_n}, \text{ по диаметру} - \mu_D = \frac{D_0 - S_0}{D_n - S_n} \text{ и суммарный } \mu_\Sigma = \mu_s \cdot \mu_D.$$

2. Рассчитывается число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_{\Sigma}}{\ln \mu_{np}}. \quad (3.1)$$

Полученное число округляется до ближайшего целого в сторону увеличения.

Формула для расчета числа проходов получена следующим образом. Предполагается, что в каждом из n проходов коэффициент вытяжки μ_{np} , тогда суммарный коэффициент вытяжки $\mu_{\Sigma} = \mu_{np}^n$. После логарифмирования последнего выражения получается формула (3.1).

3. Средние коэффициенты вытяжки за проход:

$$\mu_{Scp} = \sqrt[n]{\mu_{S\Sigma}}; \quad \mu_{Dcp} = \sqrt[n]{\mu_{D\Sigma}}.$$

4. Коэффициенты вытяжки по проходам.

4.1. При КО, СО, ДО волочении и ХПТР принимается равномерный режим вытяжек: $\mu_{Si} = \mu_{Scp}; \mu_{Di} = \mu_{Dcp}$.

4.2. При ХПТ принимается нарастающий режим деформаций; если число проходов $n \leq 3$:

$$\mu_{Si} = k_s^{i-2} \mu_{Scp}; \quad \mu_{Di} = k_D^{i-2} \mu_{Dcp}, \quad (3.2)$$

где $k_s = 1,05 \dots 1,3$ – коэффициент нарастания деформаций по стенке; $k_D = 1,02 \dots 1,2$ – коэффициент нарастания деформаций по диаметру.

При ХПТ коэффициенты нарастания деформации выбираются так, чтобы $k_s > k_D$, то есть преимущественное обжатие должно происходить по стенке. Например, при $n=3$ формулы (3.2) примут вид:

$$\text{для 1-го прохода (i=1)} \quad \mu_{S1} = \frac{1}{k_s} \mu_{Scp}; \quad \mu_{D1} = \frac{1}{k_D} \mu_{Dcp};$$

$$\text{для 2-го прохода (i=2)} \quad \mu_{S2} = \mu_{Scp}; \quad \mu_{D2} = \mu_{Dcp};$$

для 3-го прохода ($i=3$) $\mu_{S3} = k_s \mu_{Scp}$; $\mu_{D3} = k_D \mu_{Dcp}$.

5. Размеры труб по проходам рассчитываются последовательно, начиная с первого:

$$S_i = \frac{S_{i-1}}{\mu_{si}} ; \quad D_i = \frac{D_{i-1} - S_{i-1}}{\mu_{Di}} + S_i \Rightarrow D_i^* ,$$

где D_i^* – диаметр, округленный с учетом имеющегося парка инструмента.

Если длиннооправочное волочение является последним проходом получения труб, то учитывают подъем диаметра при обкатке:

$$\Delta D_n = 0,01 \cdot D_n. \quad (3.3)$$

Тогда наружный диаметр готовой трубы с учетом подъема

$$D'_n = D_n + \Delta D_n = 1,01 \cdot D_n. \quad (3.4)$$

3.3.2. Расчет размеров труб по проходам при волочении без оправки

Исходные данные: размеры трубы перед БО – D_0 , S_0 , диаметр трубы после БО – D_n .

Определить: число проходов n , размеры трубы после каждого прохода D_i , S_i , в том числе и конечную толщину стенки S_n .

Последовательность расчета.

1. Допуская, в первом приближении, изменение стенки малым ($S_0 \approx S_n$), считают, что суммарный коэффициент вытяжки равен коэффициенту вытяжки по диаметру:

$$\mu_\Sigma \approx \mu_D = \frac{D_0 - S_0}{D_n - S_0}.$$

2. Определяется предельный коэффициент вытяжки за весь маршрут волочения с использованием данных, приведенных на с. 28. Принимают минимальное значение μ_{np} из значений, соответствующих исходной (D_0/S_0) и конечной (D_n/S_n) относительной тонкостенности.

3. Рассчитывается число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_{\Sigma}}{\ln \mu_{np}}.$$

Полученное число округляется до ближайшего целого в сторону увеличения.

4. Средний коэффициент вытяжки по диаметру:

$$\mu_{Dcp} = \sqrt[n]{\mu_{D\Sigma}}.$$

5. Принимается равномерный режим обжатий:

$$\mu_{Di} = \mu_{Dcp}.$$

6. Рассчитываются размеры трубы по проходам:

$$D_i = \frac{D_{i-1} - S_{i-1}}{\mu_{Di}} + S_{i-1} \Rightarrow D_i^* ; \quad S_i = S_{i-1} + \Delta S_i,$$

где D_i^* – диаметр, округленный с учетом имеющегося парка инструмента;
 ΔS_i – изменение толщины стенки в данном проходе волочения,
 рассчитывается по формулам (2.2)...(2.4).

3.3.3. Расчет размеров труб по проходам при волочении на линии длиннооправочного волочения (ЛДО)

Исходные данные: размеры трубы перед ЛДО – D_0 , S_0 , размеры трубы после ЛДО – D_n , S_n . Число проходов $n = 2$ или 3 в зависимости от кратности линии (ее конструкции).

Определить: размеры трубы D_i , S_i после каждого прохода.

Последовательность расчета.

1. Определяются суммарные коэффициенты вытяжки: по стенке,

$$\mu_s = \frac{S_0}{S_n}, \text{ по диаметру, } \mu_D = \frac{D_0 - S_0}{D_n - S_n}, \text{ и суммарный, } \mu_{\Sigma} = \mu_s \cdot \mu_D.$$

Делается проверка: $\mu_{\Sigma} \leq \mu_{np} = 5,5$ (табл. 2.2). Если условие не выполняется, уменьшают обжатия либо производят два цикла и более ЛДО.

1. Рассчитывается диаметр оправки (все проходы выполняются на одной оправке):

$$D_{on} = D_n - 2S_n.$$

Проверяется условие свободного введения оправки в заготовку:

$$\Delta_l = D_0 - 2S_0 - D_{on} = 0,5 \dots 5 \text{ мм.} \quad (3.5)$$

Если условие (3.5) не выполняется, корректируют размеры заготовки либо режим обжатий.

2. Средний коэффициент вытяжки по стенке за проход:

$$\mu_{Scp} = \sqrt[n]{\mu_S}.$$

4. Коэффициенты вытяжки по проходам:

$$\mu_{Si} = k_{s1}^{i-2} \mu_{Scp},$$

где $k_{s1} = 0,95$ – коэффициент падения деформаций по стенке в связи с отсутствием промежуточных отжигов.

5. Размеры труб по проходам:

$$S_i = \frac{S_{i-1}}{\mu_{si}}; \quad D_i = D_{on} + 2S_i.$$

Если ЛДО – заключительная операция холодной деформации труб, то учитывают подъем диаметра при обкатке по формулам (3.3) и (3.4).

3.4. Потери металла на вспомогательных операциях

Потери при проведении большинства операций рассчитываются в процентах от массы обрабатываемых труб (см. с. 63).

Для оценки потерь металла рассчитывается расходный коэффициент:

$$K_p = \frac{G_0}{G_0 - \sum_{i=0}^n m_i}, \quad (3.6)$$

где G_0 – масса заданной в холодный передел заготовки; i – номер цикла (0 – нулевой цикл по обработке исходной заготовки); n – число циклов (проходов); m_i – потери металла в i -м цикле по массе.

Потери металла на вспомогательных операциях, %:

Расточка-обточка заготовки	10...12
Шлифовка заготовки	2,5
Шлифовка готовой трубы	0,5
Кислотное травление	0,5
Щелочно-кислотное травление	1,5
Пассивирование	0,5
Отжиг в окислительной атмосфере	0,75
Закалка и отпуск	1,0
Нагрев в защитной атмосфере	0,1
Обрезка концов перед прокаткой	1,0
Обрезка волочильных головок	3,0
Обрезка концов при сдаче	2,0
Обрезка концов для испытаний труб из сталей углеродистых и легированных	1,0
коррозионно-стойких	2,5
Разрезка труб при сдаче:	
мерная длина до 6 м	7,0
мерная длина 6-12 м	3,0
немерная длина до 6 м	5,0
немерная длина 6-12 м	2,5
Брак:	
при волочении труб $D > 15$ мм	0,5
при волочении труб $D < 15$ мм	0,75
при прокатке	1,0...2,0
при сдаче готовых труб	1,0

3.5. Составление технологической карты

Проведенные технологические расчеты сводятся в технологическую карту, пример которой представлен табл. 3.4. Оформление технологической карты рассмотрим на примере.

Пример 1. Составим технологическую карту изготовления труб размерами 20 x 2 мм из стали марки 10 немерной длины общего назначения.

Рассчитаем площадь поперечного сечения F_i , коэффициенты вытяжки μ_i и массу погонного метра труб \bar{G}_i в каждом i -м проходе по формулам:

$$F_i = \pi \cdot (D_i - S_i) \cdot S_i; \quad \mu_i = \frac{F_{i-1}}{F_i}; \quad \bar{G}_i = \gamma F_i,$$

где γ – плотность стали (сплава): для сталей $\gamma = 7800 \text{ кг/м}^3$; для титана – 4500; алюминия – 2700; меди – 8940; циркония – 6500.

0-й цикл:

$$F_0 = \pi \cdot (D_0 - S_0) \cdot S_0 = 3,14 \cdot (57,0 - 4,0) \cdot 4,0 = 666,02 \text{ мм}^2;$$

$$\bar{G}_0 = 0,0245 \cdot (D_0 - S_0) \cdot S_0 = 0,0245 \cdot (57,0 - 4,0) \cdot 4 = 5,23 \text{ кг},$$

где $0,0245 = \pi \cdot \gamma$ для стали.

1-й проход:

$$F_1 = \pi \cdot (D_1 - S_1) \cdot S_1 = 3,14 \cdot (35,0 - 2,3) \cdot 2,3 = 236,28 \text{ мм}^2;$$

$$\mu_1 = \frac{F_0}{F_1} = \frac{666,02}{236,28} = 2,8;$$

$$\bar{G}_1 = 0,0245 \cdot (D_1 - S_1) \cdot S_1 = 0,0245 \cdot (35,0 - 2,3) \cdot 2,3 = 1,85 \text{ кг}.$$

2-й проход:

$$F_2 = \pi \cdot (D_2 - S_2) \cdot S_2 = 3,14 \cdot (28,0 - 1,95) \cdot 1,95 = 170,87 \text{ мм}^2;$$

$$\mu_2 = \frac{F_1}{F_2} = \frac{236,28}{170,87} = 1,38;$$

$$\bar{G}_2 = 0,0245 \cdot (D_2 - S_2) \cdot S_2 = 0,0245 \cdot (28,0 - 1,95) \cdot 1,95 = 1,34 \text{ кг}.$$

3-й проход:

$$F_3 = \pi \cdot (D_3 - S_3) \cdot S_3 = 3,14 \cdot (20,0 - 2,0) \cdot 2,0 = 113,1 \text{ мм}^2;$$

$$\mu_3 = \frac{F_2}{F_3} = \frac{170,87}{113,1} = 1,51;$$

$$\bar{G}_3 = 0,0245 \cdot (D_3 - S_3) \cdot S_3 = 0,0245 \cdot (20,0 - 2,0) \cdot 2,0 = 0,89 \text{ кг}.$$

Для выбора необходимого количества оборудования и учета его загрузки подсчитывают потери металла при производстве и число метропроходов в каждом цикле.

На основании выбранных вспомогательных операций определяем потери металла в процентах от массы обрабатываемых труб по данным, приведенным на с. 64.

При подготовке и прокатке заготовки на стане ХПТ $W_0=1,5\%$ (кислотное травление 0,5% и брак при ХПТ 1%). При подготовке трубы к КО волочению и волочении $W_1=1,75\%$ (угар при отжиге 0,75%; кислотное травление 0,5%; брак при волочении 0,5 %). При подготовке труб к БО волочению и волочении $W_2=4,75\%$ (угар при отжиге 0,75%; кислотное травление 0,5%; обрезка волочильных головок 3,0%; брак при волочении 0,5%). На заключительной стадии обработки трубы $W_3=12,75\%$ (угар 0,75%; обрезка волочильных головок 3,0%; обрезка концов труб при сдаче 7,0%; обрезка концов для испытаний труб 1,0%; окончательный брак при сдаче готовых труб 1,0%).

Потребность разрезки труб на части определяется исходя из размеров входного и выходного столов станов, их габаритов, а также длины трубы после деформации: $L_i = L_{i-1} \cdot \mu_i$. При прокатке на стане ХПТ длина исходной заготовки должна быть не более 5...8 м (табл. 2.1), а длина трубы после волочения – не более 12 м (табл. 6.3). В зависимости от потребности разрезки рассчитывают количество труб в каждом цикле N_i .

Определим количество труб, получаемых в каждом проходе из одной заготовки. Выбираем длину заготовки $L_0 = 5$ м и с учетом коэффициента вытяжки рассчитываем длину трубы после первого прохода прокатки: $L_1 = 5 \cdot 2,8 = 14,0$ м. Далее делим трубу на 2 части по 7,0 м и отправляем на короткооправочное волочение, после которого получаем трубу $L_2 = 1,38 \cdot 7,0 = 9,66$ м. Перед безоправочным волочением делим каждую трубу еще на 2 части, чтобы получить длину менее 12 м: $9,66/2 = 4,83$ м. После безоправочного волочения получаем мерную длину $L_3 = 4,83 \cdot 1,51 = 7,29$ м. Таким образом, $N_0 = 1$, $N_1 = 2$, $N_2 = 4$, $N_3 = 4$.

Находим массу заготовки и потери металла m_0 после первого прохода ХПТ:

$$G_0 = \bar{G}_0 L_0 = 5,23 \cdot 5 = 26,15 \text{ кг};$$

$$G_{0\Sigma} = G_0 N_0 = 26,15 \cdot 1 = 26,15 \text{ кг};$$

$$m_0 = G_{0\Sigma} W_0 / 100 = 26,15 \cdot 0,015 = 0,39 \text{ кг}.$$

Масса и длина труб после первой прокатки и потери металла m_1 после КО волочения:

$$G_{1\Sigma} = G_{0\Sigma} - m_0 = 26,15 - 0,39 = 25,76 \text{ кг};$$

$$G_1 = \frac{G_{1\Sigma}}{N_1} = \frac{25,76}{2} = 12,88 \text{ кг};$$

$$L_1 = \frac{G_1}{\bar{G}_1} = \frac{12,88}{1,85} = 6,96 \text{ м};$$

$$m_1 = G_{1\Sigma} W_1 / 100 = 25,76 \cdot 0,0175 = 0,45 \text{ кг}.$$

Масса и длина труб после КО волочения и потери после БО волочения:

$$G_{2\Sigma} = G_{1\Sigma} - m_1 = 25,76 - 0,45 = 25,31 \text{ кг};$$

$$G_2 = \frac{G_{2\Sigma}}{N_2} = \frac{25,31}{2} = 12,65 \text{ кг};$$

$$L_2 = \frac{G_2}{\bar{G}_2} = \frac{12,65}{1,34} = 9,44 \text{ м};$$

$$m_2 = G_{2\Sigma} W_2 / 100 = 25,31 \cdot 0,0475 = 1,2 \text{ кг}.$$

Масса и длина труб после БО волочения и потери при заключительной обработке готовых труб:

$$G_{3\Sigma} = G_{2\Sigma} - m_2 = 25,31 - 1,2 = 24,11 \text{ кг};$$

$$G_3 = \frac{G_{3\Sigma}}{N_3} = \frac{24,11}{4} = 6,03 \text{ кг};$$

$$L_3 = \frac{G_3}{\bar{G}_3} = \frac{6,03}{0,89} = 6,77 \text{ м};$$

$$W_3 = G_{3\Sigma} W_3 / 100 = 24,11 \cdot 0,1275 = 3,07 \text{ кг}.$$

Для определения загрузки станов рассчитывают метропроходы – количество метров труб, проходящих через стан в каждом проходе. Количество метропроходов для каждого стана определяется по формуле:

$$M_i = L_i N_i .$$

$$M_1 = L_1 N_1 = 6,96 \cdot 2 = 13,92 \text{ м};$$

$$M_2 = L_2 N_2 = 9,44 \cdot 2 = 18,88 \text{ м};$$

$$M_3 = L_3 N_3 = 6,77 \cdot 4 = 27,08 \text{ м}.$$

Расходный коэффициент металла рассчитывается по формуле (3.6):

$$K_p = \frac{26,15}{26,15 - (0,39 + 0,45 + 1,2 + 3,07)} = 1,24.$$

Все расчеты сводятся в таблицу 3.4.

Таблица 3.4

Технологическая карта изготовления труб размером 20,0 x 2,0 мм

Номер прохода i	Размеры трубы, мм			Кэф- фици- ент вытя- жки μ_i	Кол-во метро- прохо- дов M_i	Кол- во труб N_i	Масса, кг			Потери по массе		Способ х/д, тип стана
							одного метра	одной трубы	всех труб	%	кг	
	D_i	S_i	L_i				\bar{G}_i	G_i	G_{Σ}	W_i	m_i	
0	57	4	5,0	-	-	1	5,23	26,15	26,15	1,5	0,39	-
1	35	2,3	6,96	2,8	13,92	2	1,85	12,88	25,76	1,75	0,45	ХПТ-55
2	28	1,95	9,44	1,38	18,88	2	1,34	12,65	25,31	4,75	1,2	КО ВСТ-30
3	20	2	6,77	1,51	27,08	4	0,89	6,03	24,11	8,75	3,07	БО ВСТ-30

3.6. Примеры расчета маршрутов

Пример 2. Выбрать схему производства и рассчитать размеры труб по проходкам для изготовления труб общего назначения 16 x 1,2 мм из стали 45.

1. Выбор исходной заготовки. В соответствии с табл. 3.3 выбираем горячекатаную заготовку 45 x 3 мм, полученную на ТПА с непрерывным станом.

2. Выбор схемы производства. По табл. 3.1 и 3.2 выбираем схему «З»:

КО → ДО → БО.

3. Сделаем разбивку по способам деформации против хода технологического процесса. Определим обжатие по наружному диаметру при БО: по табл. 2.2 примем $\Delta D = 9$ мм, и безоправочное волочение проведем по маршруту: $25 \times 1,1 \rightarrow 16 \times 1,2$ мм. Здесь утолщение стенки определили по инженерной методике по формуле (2.3).

Используя данные табл. 2.2, назначим маршрут ДО: $30 \times 2,2 \rightarrow 25 \times 1,1$ мм.

Заключительную деформацию проведем на КО: $45 \times 3 \rightarrow 30 \times 2,2$ мм.

4. Рассчитаем количество проходов и размеры труб при каждом способе деформации по методикам, изложенным выше. Рассмотрим проходы КО.

Определим коэффициенты вытяжки: по стенке $\mu_s = \frac{3}{2,2} = 1,36$, по диаметру

$$\mu_D = \frac{45-3}{30-2,2} = 1,51 \text{ и суммарный } \mu_{\Sigma} = 1,36 \cdot 1,51 = 2,06.$$

Рассчитаем число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_{\Sigma}}{\ln \mu_{np}} = \frac{\ln 2,06}{\ln 1,5} = 1,78 \rightarrow 2,$$

где предельный коэффициент вытяжки выбран по табл. 2.2 с некоторым запасом. Средние коэффициенты вытяжки за проход при равномерном режиме обжатий:

$$\mu_{Scp} = \sqrt{1,36} = 1,17; \quad \mu_{Dcp} = \sqrt{1,51} = 1,22.$$

Размеры труб после первого прохода КО:

$$S_1 = \frac{S_0}{\mu_{Scp}} = \frac{3}{1,17} = 2,5 \text{ мм};$$

$$D_1 = \frac{D_0 - S_0}{\mu_{Dcp}} + S_1 = \frac{45-3}{1,22} + 2,5 = 36,9 \rightarrow 36 \text{ мм}.$$

Размер D_1 назначен по рекомендациям п. 3.3.

Проверим наличие зазоров для ввода оправки при КО.

В первом проходе диаметр оправки $D_{оп} = 36 - 2 \cdot 2,5 = 31$ мм. Зазор $\Delta_1 = 45 - 2 \cdot 3 - 31 = 8$ мм более чем достаточен для ввода оправки. Для

уменьшения зазора можно использовать цилиндрическую закрепленную оправку.

Во втором проходе КО диаметр оправки $D_{оп} = 30 - 2 \cdot 2,2 = 25,6$ мм. Зазор $\Delta_1 = 36 - 2 \cdot 2,5 - 25,6 = 5,4$ мм достаточен для ввода оправки.

Далее рассмотрим ДО. Определим суммарные коэффициенты вытяжки: по стенке – $\mu_s = \frac{2,2}{1,1} = 2,0$, по диаметру – $\mu_D = \frac{30-2,2}{25-1,1} = 1,16$ и суммарный – $\mu_\Sigma = 2,0 \cdot 1,16 = 2,32$, что меньше предельного 2,5, поэтому волочение на ДО можно осуществить за один проход.

Проверим наличие зазора для ввода оправки. Так как при ДО используется цилиндрическая оправка, ее диаметр определяется внутренним диаметром готовой трубы: $D_{оп} = 25 - 2 \cdot 1,1 = 22,8$ мм. Зазор: $\Delta_1 = 30 - 2 \cdot 2,2 - 22,8 = 2,8$ мм достаточен для ввода оправки.

Далее, начиная с 4 прохода, проведем БО. Коэффициент вытяжки: $\mu_D = \frac{25-1,1}{16-1,2} = 1,62$. Предельный коэффициент вытяжки определяется в зависимости от D/S (см. с. 28). В нашем случае отношение исходных размеров $25/1,1 = 22,7$, конечных – $16/1,2 = 13,3$. Для этих диапазонов $\mu_{пр} = 1,5 \dots 1,7$, то есть БО можно провести за один проход.

Таким образом, разработанный маршрут выглядит так:

0. 45 x 3,0.
1. 36 x 2,5 КО.
2. 30 x 2,2 КО.
3. 25 x 1,1 ДО.
4. 16 x 1,2 БО.

Пример 3. Выбрать схему производства и рассчитать размеры труб по проходкам для изготовления труб 9 x 1,0 мм из стали 08Х18Н10Т.

1. Выбор исходной заготовки: в соответствии с табл. 3.3 выбираем горячекатаную заготовку 83 x 7 мм, полученную на ТПА с автоматическим станом.

2. Выбор схемы производства. По табл. 3.1 выбираем схему «А»:

ХПТ→БО.

3. Сделаем разбивку по способам деформации. На стане ХПТ спланируем прокатку до минимальных размеров $18 \times 0,9$ мм. При определении толщины стенки учтем утолщение при последующем БО волочении по формуле (2.3): $\Delta D = 9$ мм; $\Delta S = 0,01 \cdot 9 \approx 0,1$ мм. Безоправочное волочение проведем по маршруту: $18 \times 0,9 \rightarrow 9 \times 1,0$ мм.

4. Рассчитаем количество проходов и размеры труб по проходам при каждом способе деформации по методикам, изложенным выше.

Рассмотрим ХПТ: $83 \times 7 \rightarrow 18 \times 0,9$ мм.

Определим коэффициенты вытяжки: по стенке – $\mu_s = \frac{7}{0,9} = 7,78$; по

диаметру – $\mu_D = \frac{83-7}{18-0,9} = 4,44$ и суммарный – $\mu_\Sigma = 7,78 \cdot 4,44 = 34,54$.

Предельный коэффициент вытяжки за один проход рассчитаем по формуле (2.1):

$$\mu_{np} = 0,1\psi - 2 = 0,1 \cdot 71 - 2 = 5,1,$$

где $\psi = 71\%$ – относительное сужение образца трубной заготовки из стали 08Х18Н10Т (табл. 1.3).

Рассчитаем число проходов:

$$= \frac{\ln \mu_\Sigma}{\ln \mu_{np}} = \frac{\ln 34,54}{\ln 5,1} = 2,17 \rightarrow 3.$$

Средние коэффициенты вытяжки за проход:

$$\mu_{ср} = \sqrt[3]{7,78} = 1,98; \quad \mu_{Dср} = \sqrt[3]{4,44} = 1,64.$$

При ХПТ примем нарастающий режим деформаций ($k_s = 1,2$; $k_D = 1,1$).

Рассчитаем коэффициенты вытяжки по проходам:

$$\text{для 1-го прохода (i=1)} \quad \mu_{s1} = \frac{1,98}{1,2} = 1,65; \quad \mu_{D1} = \frac{1,64}{1,1} = 1,49;$$

$$\text{для 2-го прохода (i=2)} \quad \mu_{s2} = 1,98; \quad \mu_{D2} = 1,64.$$

После 3-го прохода получаем размер 18 x 0,9 мм.

Размеры труб по проходам рассчитываем последовательно, начиная с первого:

$$S_1 = \frac{S_0}{\mu_{s1}} = \frac{7}{1,65} = 4,2 \text{ мм};$$

$$D_1 = \frac{D_0 - S_0}{\mu_{D1}} + S_1 = \frac{83 - 7}{1,49} + 4,2 = 55,2 \rightarrow 55 \text{ мм}.$$

$$S_2 = \frac{S_1}{\mu_{s2}} = \frac{4,2}{1,98} = 2,1 \text{ мм};$$

$$D_2 = \frac{D_1 - S_1}{\mu_{D2}} + S_2 = \frac{55 - 4,2}{1,64} + 2,1 = 33,1 \rightarrow 32 \text{ мм}.$$

Здесь диаметры выбраны с учетом условно имеющихся калибров (см. п. 3.3).

Рассмотрим волочение БО: 18 x 0,9 \rightarrow 9 x 1,0 мм.

Коэффициент вытяжки: $\mu_D = \frac{18 - 0,9}{9 - 1,0} = 2,14$. Предельный коэффициент

вытяжки определим в зависимости от D/S (см. с. 28). В нашем случае отношение исходных размеров 18/0,9 = 20 ($\mu_{np} = 1,7$), конечных – 9/1 = 9 ($\mu_{np} = 1,33$). Выбираем меньший из двух: $\mu_{np} = 1,33$.

Рассчитаем число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_D}{\ln \mu_{np}} = \frac{\ln 2,14}{\ln 1,33} = 2,67 \rightarrow 3.$$

Средний коэффициент вытяжки по диаметру:

$$\mu_{Dcp} = \sqrt[3]{\mu_D} = \sqrt[3]{2,14} = 1,29.$$

Рассчитываем размеры труб по проходам, принимаем равномерный режим обжатий (здесь исходные размеры соответствуют размерам перед волочением БО):

$$D_1 = \frac{D_0 - S_0}{\mu_{Dcp}} + S_0 = \frac{18 - 0,9}{1,29} + 0,9 = 14,2 \rightarrow 14 \text{ мм}; \quad S_1 = S_0 + \Delta S_1,$$

где ΔS_1 – изменение толщины стенки в первом проходе волочения, рассчитывается по формуле (2.3).

$$\Delta S_1 = 0,01 \cdot \Delta D_1 = 0,01 \cdot (18-14) = 0,04 \text{ мм};$$

$$S_1 = 0,9 + 0,04 = 0,94 \text{ мм}.$$

Для второго прохода БО:

$$D_2 = \frac{D_1 - S_1}{\mu_{\text{Дсп}}} + S_1 = \frac{14 - 0,94}{1,29} + 0,94 = 11,1 \rightarrow 11 \text{ мм}; S_2 = S_1 + \Delta S_2;$$

$$\Delta S_2 = 0,01 \cdot \Delta D_2 = 0,01 \cdot (14-11) = 0,03 \text{ мм};$$

$$S_2 = 0,94 + 0,03 = 0,97 \text{ мм}.$$

Здесь наружные диаметры округлены с учетом имеющегося парка волок (условно).

После третьего прохода получаем готовый размер.

Итоговый маршрут:

0. 83 x 7.
1. 55 x 4,2 ХПТ.
2. 32 x 2,1 ХПТ.
3. 18 x 0,9 ХПТ.
4. 14 x 0,94 БО.
5. 11 x 0,97 БО.
6. 9 x 1,0 БО.

Пример 4. Выбрать схему производства и рассчитать размеры труб по проходам для изготовления труб общего назначения 32 x 0,3 мм из коррозионно-стойкой стали 08X18N10T, заготовка имеет размер 83 x 8 мм.

1. Выбор схемы производства. По табл. 3.2 выбираем схему «Г»:

ХПТ→БО→ХПТР.

На заключительной стадии БО применять нельзя, так как $D/S > 50$.

2. Сделаем разбивку по способам деформации против хода технологического процесса. Для получения тонкой стенки 0,3 мм потребуется несколько проходов ХПТР, так как на стане ХПТ можно выкатать стенку не менее 0,8 мм. Учитывая, что на стане ХПТР за один

проход стенка обжимается примерно на 50%, а обжатие по наружному диаметру составляет до 4 мм, спланируем следующую деформацию: $38 \times 2 \rightarrow 32 \times 0,3$ мм.

Далее наметим деформацию при БО волочении, принимая во внимание утолщение стенки и ограничение по тонкостенности труб, прокатываемых на стане ХПТ ($D/S < 25$): $48 \times 1,9 \rightarrow 38 \times 2$ мм. Здесь утолщение стенки определим по формуле (2.3): $\Delta S = 0,01 \cdot 10 = 0,1$ мм.

Заключительную деформацию проведем на ХПТ: $83 \times 8 \rightarrow 48 \times 1,9$ мм.

3. Рассчитаем количество проходов и размеры труб по проходам при каждом способе деформации по методикам, изложенным выше. Рассмотрим ХПТ: $83 \times 8 \rightarrow 48 \times 1,9$ мм. Определим коэффициенты вытяжки: по стенке –

$$\mu_S = \frac{8}{1,9} = 4,21; \quad \text{по диаметру} \quad \mu_D = \frac{83-8}{48-1,9} = 1,63 \quad \text{и суммарный} \quad \mu_\Sigma = 4,21 \cdot 1,63 = 6,85.$$

Предельный коэффициент вытяжки за один проход рассчитаем по формуле (2.1):

$$\mu_{np} = 0,1\psi - 2 = 0,1 \cdot 71 - 2 = 5,1,$$

где $\psi = 71\%$ – относительное сужение образца трубной заготовки из стали 08Х18Н10Т (табл. 1.3).

Рассчитаем число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_\Sigma}{\ln \mu_{np}} = \frac{\ln 6,85}{\ln 5,1} = 1,18 \rightarrow 2.$$

Средние коэффициенты вытяжки за проход:

$$\mu_{Scp} = \sqrt{4,21} = 2,05; \quad \mu_{Dcp} = \sqrt{1,63} = 1,28.$$

При ХПТ примем нарастающий режим деформаций ($k_s = 1,05$; $k_D = 1,02$).

Рассчитаем коэффициенты вытяжки по проходам. В 1-м проходе ($i=1$):

$$\mu_{s1} = \frac{2,05}{1,05} = 1,95; \quad \mu_{D1} = \frac{1,28}{1,02} = 1,26;$$

Размеры труб после первого прохода:

$$S_1 = \frac{S_0}{\mu_{S1}} = \frac{8}{1,95} = 4,1 \text{ мм}; \quad D_1 = \frac{D_0 - S_0}{\mu_{D1}} + S_1 = \frac{83 - 8}{1,26} + 4,1 = 63,6 \rightarrow 63 \text{ мм}.$$

Здесь диаметр выбран с учетом условно имеющихся калибров (см. п. 3.3).

После 2-го прохода получаем размер 48 x 1,9 мм.

Рассмотрим БО волочение: 48 x 1,9 → 38 x 2 мм.

Коэффициент вытяжки: $\mu_D = \frac{48 - 1,9}{38 - 2,0} = 1,28$. Предельный коэффициент

вытяжки определим в зависимости от D/S (см. с. 28). В нашем случае отношение исходных размеров 48/1,9 = 25,3 ($\mu_{пр} = 1,33$), конечных – 38/2 = 19 ($\mu_{пр} = 1,7$). Выбираем меньший из двух: $\mu_{пр} = 1,33$. Так как $\mu_D < \mu_{пр}$, деформацию можно осуществить за один проход.

Рассмотрим прокатку на стане ХПТР: 38 x 2 → 32 x 0,3 мм.

Определим коэффициенты вытяжки: по стенке – $\mu_S = \frac{2}{0,3} = 6,67$; по

диаметру – $\mu_D = \frac{38 - 2}{32 - 0,3} = 1,14$ и суммарный – $\mu_{\Sigma} = 6,67 \cdot 1,14 = 7,6$.

Рассчитаем число проходов:

$$n = \frac{\ln \mu_{\Sigma}}{\ln \mu_{пр}} = \frac{\ln 7,6}{\ln 2,5} = 2,21 \rightarrow 3.$$

Средние коэффициенты вытяжки за проход:

$$\mu_{Scp} = \sqrt[3]{6,67} = 1,88; \quad \mu_{Dcp} = \sqrt[3]{1,14} = 1,05.$$

Размеры труб по проходам при равномерном режиме обжатий рассчитываем последовательно, начиная с первого (для ХПТР):

$$S_1 = \frac{S_0}{\mu_{Scp}} = \frac{2}{1,88} \approx 1,1 \text{ мм}; \quad D_1 = \frac{D_0 - S_0}{\mu_{Dcp}} + S_1 = \frac{38 - 2}{1,05} + 1,1 = 35,4 \rightarrow 35 \text{ мм}.$$

$$S_2 = \frac{S_1}{\mu_{Scp}} = \frac{1,1}{1,88} \approx 0,6 \text{ мм}; \quad D_2 = \frac{D_1 - S_1}{\mu_{Dcp}} + S_2 = \frac{35 - 1,1}{1,05} + 0,6 = 32,9 \rightarrow 33 \text{ мм}.$$

Здесь диаметры выбраны с учетом условно имеющихся роликов, с точностью до целых.

После 3-го прохода получаем окончательный размер.

Таким образом, спланировали следующие проходы ХПТР:

0. 38 x 2.
1. 35 x 1,1.
2. 33 x 0,6.
3. 32 x 0,3.

Проверим наличие зазоров для ввода цилиндрической оправки ХПТР.

В первом проходе диаметр оправки $D_{оп} = 35 - 2 \cdot 1,1 = 32,8$ мм. Зазор $\Delta_1 = 38 - 2 \cdot 2 - 32,8 = 1,2$ мм достаточен для ввода оправки (см. табл. 2.2).

Во втором проходе диаметр оправки $D_{оп} = 33 - 2 \cdot 0,6 = 31,8$ мм. Зазор $\Delta_1 = 35 - 2 \cdot 1,1 - 31,8 = 1,0$ мм достаточен для ввода оправки.

В третьем проходе диаметр оправки $D_{оп} = 32 - 2 \cdot 0,3 = 31,4$ мм. Зазор $\Delta_1 = 33 - 2 \cdot 0,6 - 31,4 = 0,4$ мм недостаточен для ввода оправки.

Для увеличения зазора в третьем проходе немного уменьшим стенку после второго прохода: 32 x 0,5 мм, тогда зазор будет 0,6 мм.

Таким образом, разработан следующий маршрут:

0. 83 x 8.
1. 63 x 4,1 ХПТ.
2. 48 x 1,9 ХПТ.
3. 38 x 2,0 БО.
4. 35 x 1,1 ХПТР.
5. 33 x 0,5 ХПТР.
6. 32 x 0,3 ХПТР.

4. Прокатка на станах ХПТ

4.1. Основные понятия и определения

Прокатка на станах ХПТ и ХПТР относится к *периодической*, так как труба прокатывается порциями. Различают холостой и рабочий периоды процесса. В холостом периоде производится *подача* m очередной порции исходной заготовки размерами $D_0 \times S_0$. Объем подачи (рис. 4.1)

$$V_{\Pi} = \pi \cdot m \cdot S_0 (D_0 - S_0). \quad (4.1)$$

На большинстве станов перед обратным ходом клетки труба кантуется на угол *кантовки* $\varphi_k = 50 \dots 90^\circ$, хотя известны станы, где подача и кантовка трубы осуществляются одновременно.

Рабочий период включает деформацию трубы при прямом и обратном ходе клетки, причем примерно 70% объема подачи раскатывается при прямом ходе клетки.

Приводные валки (калибры) станов ХПТ имеют сужающийся по ходу прокатки ручей и называются *пилигримовыми*. Деформация трубы производится за счет уменьшения высоты калибра на длинной слабо-конической оправке.

При периодической прокатке используют понятия *рабочий конус* и *мгновенный очаг деформации* (МОД).

Наружная поверхность рабочего конуса с образующей $D(x)$ повторяет развертку ручья валка вдоль оси прокатки (см. рис. 4.1). Функция $D(x)$ задается калибровкой валков (калибров) станов.

Рабочий конус длиной l_p состоит из следующих участков: редуцирования $l_{ред}$, обжатия $l_{обж}$ и калибровки l_k .

Каждое поперечное сечение рабочего конуса (см. верхнюю часть рис. 4.1) ограничено круглым калибром с выпусками. Выпуски способствуют лучшему захвату трубы и создают некоторое уширение трубы при прямом ходе клетки, которое определяется шириной калибра B . Раскатка образовавшихся утолщений при обратном ходе клетки улучшает проработку структуры металла и способствует уменьшению поперечной разностенности.

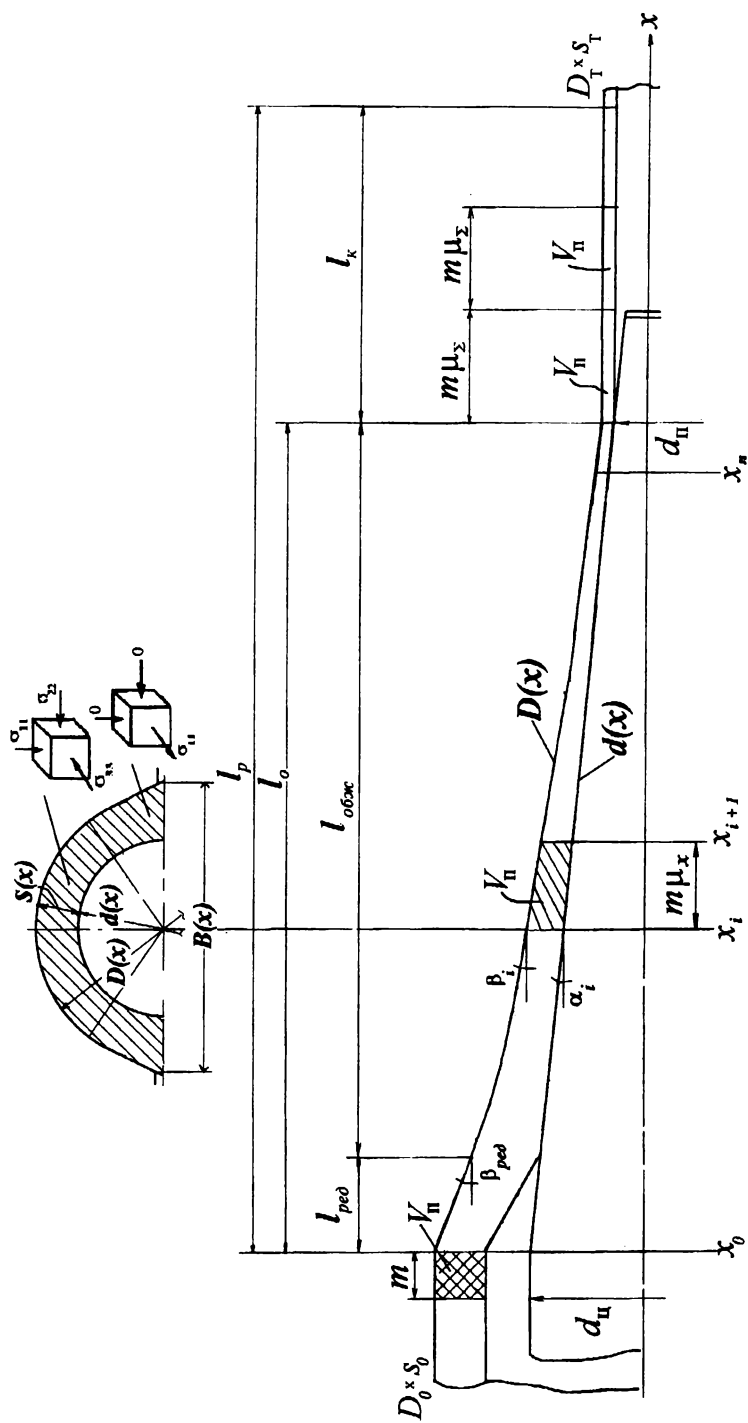


Рис. 4.1.1. Рабочий конус при периодической прокатке

Разность ширины и диаметра калибра называется *развалкой калибра*:

$$\Delta b = B - D. \quad (4.2)$$

При прокатке труб со значительной развалкой вследствие неравномерности обжатий по периметру калибра возникают различные схемы напряженного состояния (см. рис. 4.1). В области вершины калибра схема напряженного состояния приближается к неравномерному всестороннему сжатию, а в частях сечения, соответствующих выпускам, деформирование металла протекает при схеме напряженного состояния, близкой к линейному растяжению. Такая схема напряженного состояния неблагоприятна и может привести к образованию поперечных трещин.

Линейное смещение $m\mu_{\Sigma}$ – длина участка готовой трубы, который до прокатки был равен подаче m . Длина калибрующего участка выбирается в зависимости от линейного смещения:

$$l_k = K_{\Pi} m\mu_{\Sigma}, \quad (4.3)$$

где $K_{\Pi} = 2 \dots 4$ – коэффициент полировки, равный числу обжатий объема подачи V_{Π} (см. рис. 4.1) на калибрующем участке, что обеспечивает требуемую точность труб по наружному диаметру.

Коэффициент дробности деформации [7]:

$$n = \frac{3l_{\text{обж}}}{m(1 + 2\mu_{\Sigma})}, \quad (4.4)$$

т. е. числу обжатий каждого поперечного сечения при прохождении рабочего конуса, обычно $n = 20 \dots 30$. Чем выше n , тем выше пластичность металла, при $n < 10$ – большая вероятность образования трещин.

Истинное обжатие стенки трубы за цикл периодической прокатки рассчитывается по правилу П. Т. Емельяненко: для определения истинного обжатия в данном сечении рабочего конуса с координатой x_i надо найти координату сечения x_{i+1} , отстоящего от данного на величину объема подачи V_{Π} , и взять разность толщин стенок в этих сечениях. Причем для нахождения второй координаты используется условие равенства объемов:

$$V_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \int_{x_i}^{x_{i+1}} (D^2(x) - d^2(x)) dx. \quad (4.5)$$

Используя обозначения рис. 4.1, истинное обжатие в сечении x_i можно рассчитать так:

$$\Delta S_i = S_i - S_{i+1}. \quad (4.6)$$

Истинное обжатие разделяется на прямой и обратный ход клетки:

$$\Delta S_i = \Delta S_{\text{при}} + \Delta S_{\text{обри}}, \quad (4.7)$$

причем для большинства станов

$$\Delta S_{\text{при}} = 0,7 \Delta S_i; \quad (4.8)$$

$$\Delta S_{\text{обри}} = 0,3 \Delta S_i. \quad (4.9)$$

Считая образующие рабочего конуса прямыми, истинное обжатие по толщине стенки можно рассчитать по формуле

$$\Delta S_i = m \mu_i (tg \beta_i - tg \alpha_i), \quad (4.10)$$

а истинное обжатие по радиусу трубы – по формуле

$$\Delta R_i = m \mu_i tg \beta_i, \quad (4.11)$$

где $m \mu_i$ – текущее линейное смещение; $\mu_i = \frac{S_0(D_0 - S_0)}{S_i(D_i - S_i)}$ – текущий

коэффициент вытяжки; $tg \beta_i = \left| \frac{1}{2} D'(x)_{/x_i} \right|$ – конусность развертки калибра в

данном сечении; $tg \alpha_i = \left| \frac{1}{2} d'(x)_{/x_i} \right|$ – конусность оправки в данном сечении

(здесь штрихом обозначена производная соответствующей функции).

Для расчета калибровки инструмента обычно задается режим истинных относительных обжатий:

$$f(x) = \Delta S_i / S_i, \quad (4.12)$$

где абсолютное истинное обжатие ΔS_i определяется по формуле (4.6).

К функции $f(x)$ обычно предъявляются следующие требования. Она должна быть монотонно убывающей:

$$f'(x) < 0, \quad (4.13)$$

вогнутой:

$$f''(x) > 0 \quad (4.14)$$

и должна затухать (стремиться к 0) к концу обжимного участка:

$$\lim_{x \rightarrow x_0} f(x) = 0. \quad (4.15)$$

Мгновенный очаг деформации (МОД) – часть рабочего конуса, деформируемая в данный момент времени. Каждому поперечному сечению рабочего конуса можно поставить в соответствие МОД.

4.2. Соотношения в мгновенном очаге деформации

4.2.1. Геометрические соотношения

Параметры МОД изменяются по длине рабочего конуса и различны для прямого и обратного хода клетки. МОД строится для произвольного i -го поперечного сечения рабочего конуса, где калибровкой заданы размеры трубы D_i х S_i , при прямом или обратном ходе клетки (рис. 4.2, 4.3).

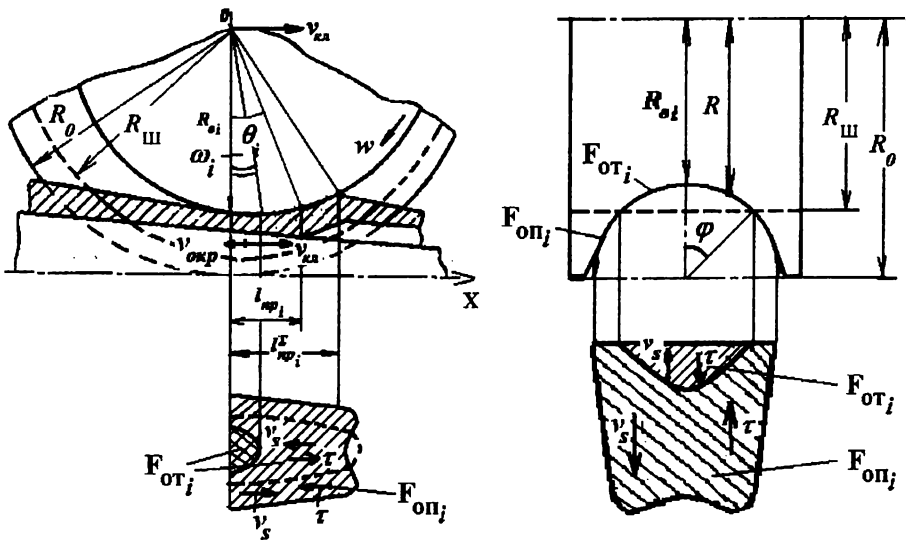


Рис. 4.2. МОД при прямом ходе клетки

На рис. 4.2., 4.3 стрелками показаны направление движения клетки со скоростью $v_\text{кл}$ и вращения валков с угловой скоростью ω . Основными параметрами МОД являются угол захвата θ_i , длина и площадь

горизонтальной проекции контактной поверхности. Полная длина МОД

$$l_{npi}^{\Sigma} = \sqrt{2R_{ei} \cdot \Delta R_i},$$

где $R_{ei} = R_0 - D/2$ – радиус валка по вершине калибра; R_0 – радиус валка по реборде (рис. 4.2); истинное обжатие по радиусу трубы ΔR_i рассчитывается по формуле (4.11).

МОД состоит из зоны обжатия и зоны редуцирования. Обычно в расчетах зоной редуцирования пренебрегают и рассчитывают параметры для зоны обжатия. Длина очага деформации в зоне обжатия стенки для прямого и обратного хода клетки рассчитывается по формулам:

$$l_{npi} = \sqrt{2R_{ei} \cdot \Delta S_{npi}}, \quad (4.16)$$

$$l_{обpi} = \sqrt{2R_{ei} \cdot \Delta S_{обpi}}, \quad (4.17)$$

где ΔS_{npi} и $\Delta S_{обpi}$ определяются по соотношениям (4.8), (4.9).

Угол захвата в зоне обжатия стенки

$$\theta_i = \sqrt{\frac{2\Delta S_{npi}}{R_{ei}}}. \quad (4.18)$$

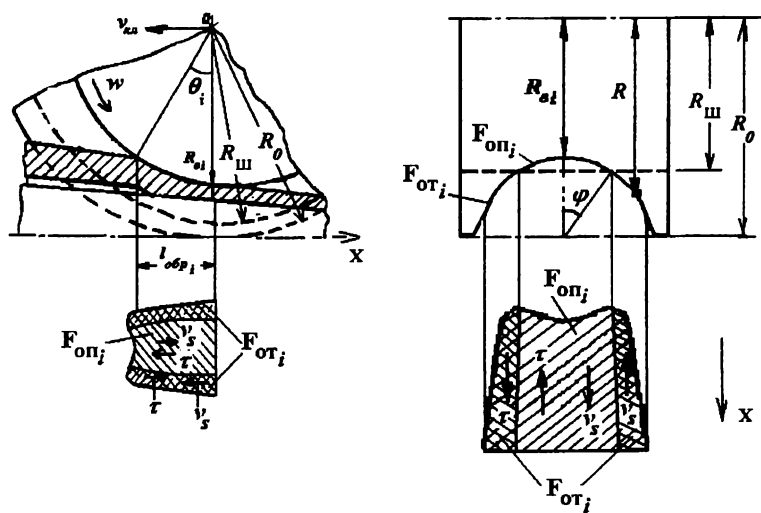


Рис. 4.3. МОД при обратном ходе клетки

Площадь горизонтальной проекции контактной поверхности при прямом и обратном ходе клетки определяется по формулам:

$$F_{np_i} = \eta D_i l_{np_i} + \Delta F_i; \quad (4.19)$$

$$F_{обр_i} = \eta D_i l_{обр_i} + \Delta F_i, \quad (4.20)$$

где

$$\Delta F_i = 3,9 \cdot 10^{-5} \sigma_s D_i \left(\frac{\pi R_0}{8} - \frac{D_i}{6} \right) - \quad (4.21)$$

– приращение контактной поверхности за счет упругого сплющивания валков; $\eta=1,20\dots1,25$ – коэффициент формы контактной поверхности для двухвалковых станков; D_i – диаметр трубы в данном сечении; $l_{пр_i}$, $l_{обр_i}$ – длина МОД при прямом и обратном ходе клетки (4.16), (4.17); R_0 – радиус калибра по реборде; σ_s – временное сопротивление металла трубы, рассчитывается по (1.2).

В дальнейших выкладках для упрощения записи индексы «пр» и «обр», относящиеся к прямому или обратному ходу клетки, будем опускать, предварительно оговаривая, о каком ходе клетки идет речь.

Далее будет показано, что в зависимости от направления скорости скольжения металла по валку v_s контактная поверхность с валком чаще всего делится на зоны опережения и отставания:

$$F_i = F_{on_i} + F_{от_i}. \quad (4.22)$$

4.2.2. Скоростные условия

Разность скоростей металла и валка на контактной поверхности оценивается скоростью скольжения:

$$v_s = v_{me} - v_v, \quad (4.23)$$

где v_{me} – скорость металла; v_v – скорость точек на поверхности валка (калибра).

Скорость скольжения может быть положительной или отрицательной, то есть направленной по движению металла (вдоль оси X на рис. 4.2) или против него. В зависимости от направления v_s контактная поверхность с валком делится на зоны опережения и отставания (4.22).

В зоне опережения скорость металла больше скорости валка:

$$v_{me} > v_b \text{ и } v_s > 0. \quad (4.24)$$

В зоне отставания скорость валка больше скорости металла:

$$v_b > v_{me} \text{ и } v_s < 0. \quad (4.25)$$

В нейтральном сечении скорости валка и металла равны:

$$v_{me} = v_b \text{ и } v_s = 0. \quad (4.26)$$

Критический угол, определяющий положение нейтрального сечения и протяженность зоны отставания при прямом ходе клетки (см. рис. 4.2), для наиболее распространенного случая $R_{ш} > R_{ei}$ рассчитывается по формуле [7]:

$$\omega_i = (1,60 \dots 1,75) \sqrt{\frac{(R_{ш} - R_{ei})S_i}{R_{ei} \cdot R_{ш}}}. \quad (4.27)$$

Для определения скорости скольжения по выражению (4.23) рассмотрим скорости точек на поверхности валка (калибра). В отличие от обычной продольной прокатки, где клеть неподвижна и валок совершает только вращательное движение, при прокатке на станах ХПТ валок кроме вращательного движения совершает поступательное вместе с клетью. Для любой точки на поверхности калибра, имеющей радиус R , окружная скорость

$$v_{окр} = wR, \quad (4.28)$$

где w – угловая скорость валка.

Скорость клетки зависит от величины радиуса ведущей шестерни:

$$v_{кл} = wR_{ш}. \quad (4.29)$$

Рассмотрим *прямой ход клетки*. Скорость любой точки на поверхности валка (с учетом направления оси X на рис. 4.2)

$$v_e = v_{кл} - v_{окр}, \quad (4.30)$$

где $v_{\text{кл}}$ – поступательная скорость клетки; $v_{\text{окр}}$ – окружная скорость валка.

С учетом (4.28) и (4.29) выражение (4.30) примет вид:

$$v_g = w(R_{\text{ш}} - R). \quad (4.31)$$

На рис. 4.4, 4.5 показаны эпюры поступательных скоростей валка вместе с клетью и окружных скоростей точек на линии центров валков, направленных против хода клетки. Для прямого хода клетки и наиболее распространенного случая $R_{\text{ш}} > R_g$ (рис. 4.4, а) скорости валка по высоте калибра имеют разные направления.

Допустим, в первом приближении, что скорость металла мала по сравнению со скоростью валка и ею можно пренебречь, тогда выражение (4.23) упростится:

$$v_s = -v_g, \quad (4.32)$$

то есть эпюра скоростей скольжения по высоте калибра имеет обратное скорости валка направление.

Запишем формулу (4.31) с учетом (4.32):

$$v_s = w(R - R_{\text{ш}}). \quad (4.33)$$

Из анализа формулы (4.33) видно, что зона опережения имеет место в областях калибра с радиусом большим, чем радиус ведущей шестерни (чаще всего это зоны, примыкающие к выпускам калибра):

$$v_s > 0 \quad \text{при} \quad R > R_{\text{ш}}.$$

В зоне отставания

$$v_s < 0 \quad \text{при} \quad R < R_{\text{ш}},$$

что иллюстрирует рис. 4.2.

Для расчета площадей зон отставания и опережения рассматривают два случая [7] по соотношению углов захвата (4.18) и нейтрального сечения (4.27):

1) $\theta_i > \omega_i$, и зона отставания ограничена полуэллипсом (рис. 4.2), площадь которого рассчитывается по выражению:

$$F_{\text{ОТ}} = \frac{1}{2} \omega_i R_i \varphi \pi R_{gi}, \quad (4.34)$$

где R_i – радиус трубы в данном i -м сечении; $\pi=3,14$; $\varphi = \arccos(\frac{R_0 - R_{ш}}{R_i})$ –

угол, определяющий положение радиуса ведущей шестерни, рад (рис. 4.2).

2) $\theta_i \leq \omega_i$, зона отставания – криволинейная трапеция (см. рис. 4.2), площадь которой определяется по формуле

$$F_{OTi} = 0,705 R_i \varphi \pi \sqrt{\Delta S_{npi} (1 - k_s) R_{gi}}, \quad (4.35)$$

где $k_s = 0,3 \dots 0,4$ – доля выпуска, не участвующая в деформации.

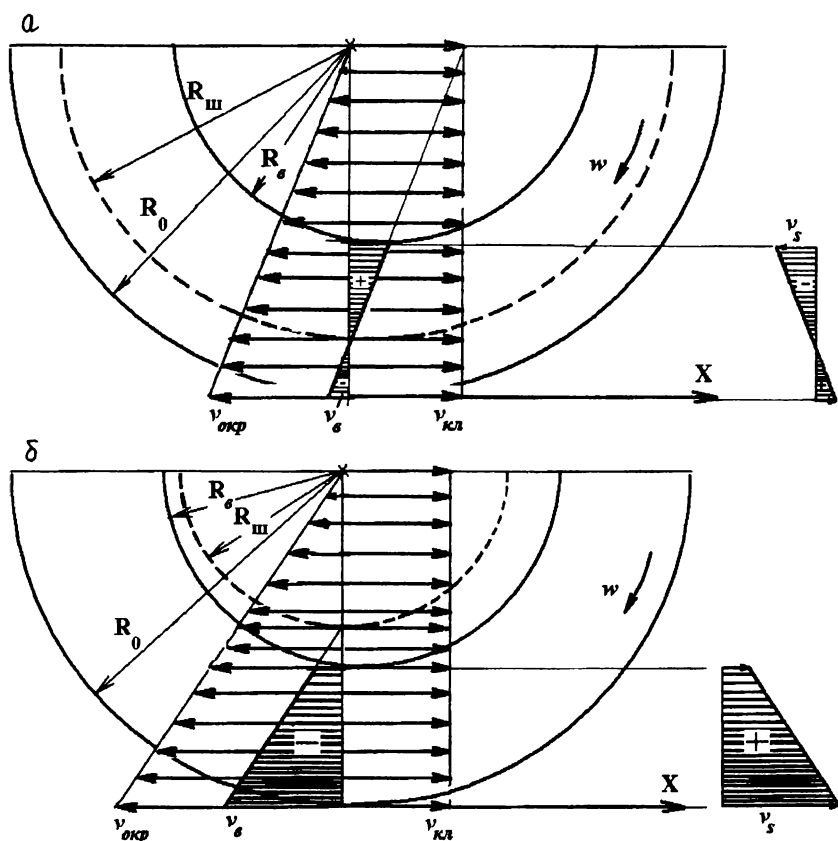


Рис. 4.4. Эпюры скоростей валка при прямом ходе клетки:

а – $R_{ш} > R_{г}$; б – $R_{ш} < R_{г}$

Зная полную площадь контактной поверхности (4.19), вычисляют площадь зоны опережения:

$$F_{\text{ОП}i} = F_i - F_{\text{ОТ}i}. \quad (4.36)$$

В случае $R_{\text{ш}} < R_e$ (рис. 4.4, б) скорость клетки меньше окружной скорости вала, на всей контактной поверхности металл опережает валок и

$$F_{\text{ОТ}i} = 0. \quad (4.37)$$

При обратном ходе клетки валок вращается в направлении расширения калибра. При заданном направлении оси X (рис. 4.3) скорость валака определится по формуле

$$v_e = v_{\text{окр}} - v_{\text{кл}},$$

после подстановки выражений (4.28) и (4.29)

$$v_e = w(R - R_{\text{ш}}).$$

Используя выражение (4.32) и допущение, что скоростью металла можно пренебречь, и получаем:

$$v_s = w(R_{\text{ш}} - R). \quad (4.38)$$

Из сравнения последнего выражения с (4.33) видно, что эпюры скоростей валака по высоте калибра имеют противоположное направление по сравнению с прямым ходом (рис. 4.4, 4.5). Для наиболее распространенного случая $R_{\text{ш}} > R_e$ (рис. 4.5, а) с учетом выражения (4.38) зона отставания имеет место в области выпусков калибра (рис. 4.3), и ее площадь рассчитывается по формуле [7]:

$$F_{\text{ОТ}i} = R_i \sqrt{\Delta S_{\text{обр}i} R_{ei}} \cdot [\pi - 2(\varphi + k_s \varphi_e)], \quad (4.39)$$

где $\varphi_e = 0,5 \dots 0,7$ – угол выпуска калибра, рад.

Затем, как и при прямом ходе клетки, определяется площадь зоны опережения по формуле (4.36).

При $R_{\text{ш}} < R_e$ (рис. 4.5, б) рассматривают два случая в зависимости от скорости металла, которая определяется текущим коэффициентом вытяжки при обратном ходе клетки [7]:

$$\mu_{\text{обр}i} = \mu_i^{0,3}. \quad (4.40)$$

При $\mu_{\text{обри}} \leq R_{\text{ei}} / R_{\text{ш}}$ скорость металла невелика, и вся контактная поверхность является зоной отставания:

$$F_i = F_{\text{оти}}. \quad (4.41)$$

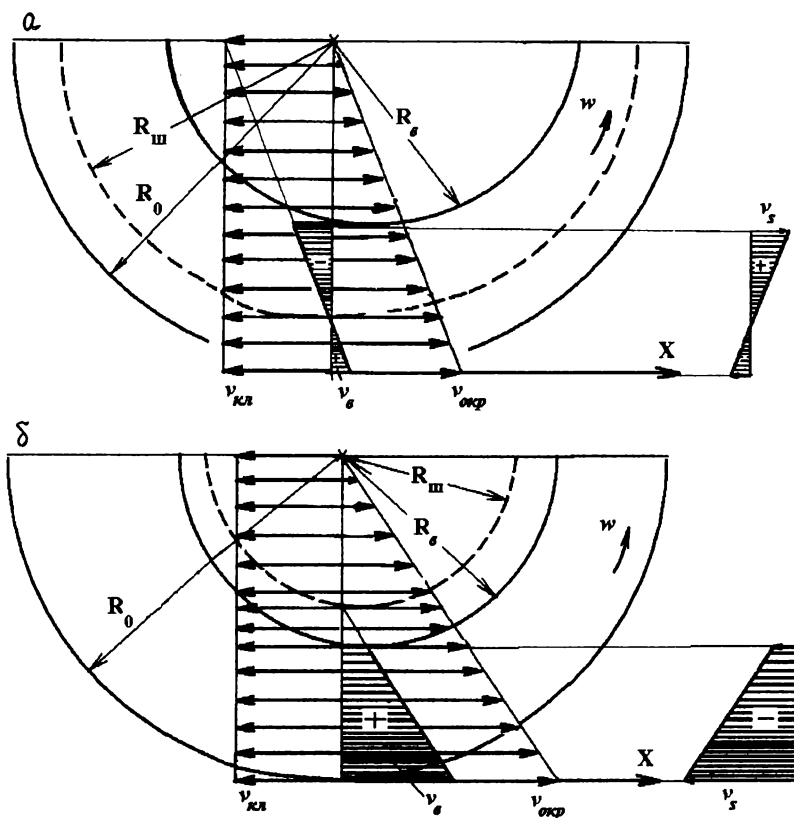


Рис. 4.5. Эпюры скоростей валка при обратном ходе клетки:
а – $R_{\text{ш}} > R_{\epsilon}$; б – $R_{\text{ш}} < R_{\epsilon}$

При $\mu_{\text{обри}} > R_{\text{ei}} / R_{\text{ш}}$ скорость металла увеличивается и вызывает повышенное скольжение по валку. В этом случае в области вершины калибра возникает зона опережения в виде полуэллипса (рис. 4.7, б), площадь которой рассчитывается по формуле [7]:

$$F_{\text{опи}} = \pi \sqrt{(R_{\text{ш}} \mu_{\text{обри}} - R_{\text{ei}}) R_i} \cdot \sqrt{\Delta S_{\text{обри}} R_{\text{ш}} - S_i (R_{\text{ei}} - R_{\text{ш}})}. \quad (4.42)$$

Затем вычисляется площадь зоны отставания по формуле

$$F_{\text{отл}} = F_i - F_{\text{опл}}. \quad (4.43)$$

Ранее было сделано допущение, что скоростью металла можно пренебречь. Рассмотрим влияние скорости металла $v_{\text{ме}} > 0$ на эпюры скоростей скольжения и положение зон опережения – отставания по глубине калибра (рис. 4.6, 4.7).

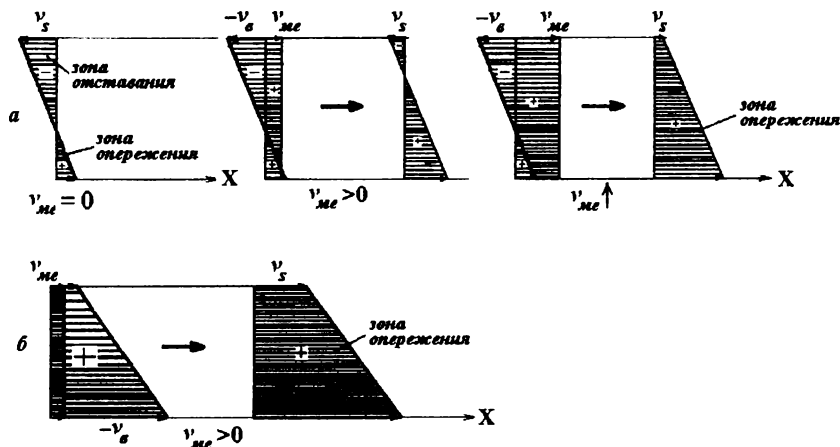


Рис. 4.6. Влияние скорости металла на эпюры скоростей скольжения по глубине калибра при прямом ходе клетки: а – $R_{\text{ш}} > R_{\text{б}}$; б – $R_{\text{ш}} < R_{\text{б}}$

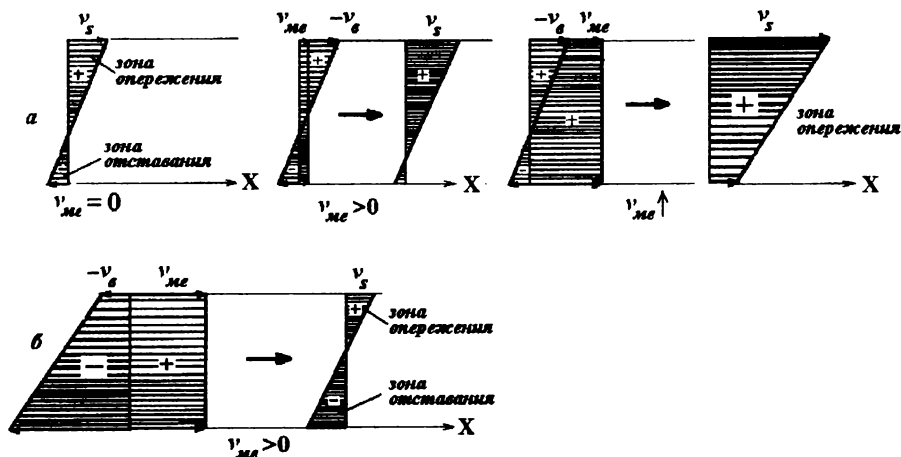


Рис. 4.7. Влияние скорости металла на эпюры скоростей скольжения по глубине калибра при обратном ходе клетки: а – $R_{\text{ш}} > R_{\text{б}}$; б – $R_{\text{ш}} < R_{\text{б}}$

При прямом ходе клетки и $R_{ш} > R_e$ (рис. 4.6, а) возрастание скорости металла приводит к уменьшению зоны отставания вплоть до полного ее исчезновения и образования однозонной контактной поверхности с опережением. При $R_{ш} < R_e$ (рис. 4.6, б) увеличение скорости металла качественно не меняет картину распределения скорости скольжения: всю контактную поверхность продолжает занимать зона опережения.

При обратном ходе клетки и $R_{ш} > R_e$ (рис. 4.7, а) влияние скорости металла на скольжение аналогично такому влиянию при прямом ходе. Для случая же $R_{ш} < R_e$ (рис. 4.7, б) увеличение скорости металла приводит к появлению зоны опережения в области вершины калибра (4.42).

4.3. Расчет калибровки инструмента

Инструмент стана ХПТ – калибры и оправка. Задача калибровки – расчет размеров инструмента, подготовка чертежей и технологической документации для изготовления инструмента.

Рациональная калибровка инструмента должна обеспечивать

- прокатку труб требуемого качества (по точности, чистоте поверхности, механическим и другим свойствам) при максимальной производительности;
- минимальные затраты энергии на деформацию;
- высокую стойкость инструмента.

Калибровка инструмента рассчитывается совместно (калибров и оправки) путем регулярного разбиения рабочего конуса на контрольные участки (сечения). Существуют методики для расчетов вручную, однако в последние десятилетия для проведения расчетов разработаны пакеты прикладных программ, позволяющие учитывать множество факторов и анализировать различные методики расчета.

В литературе рассматривается несколько поколений калибровок станов ХПТ [5].

Калибровки *первого поколения* (линейно-конусные) имели постоянную или ступенчатую конусность развертки ручья и постоянную конусность

оправки (рис. 4.8, а). Основоположником их был П.Т.Емельяненко (1937). Недостатки этих калибровок объясняются разработкой их применительно к горячей пилигримовой прокатке. Они отличались возрастанием относительных обжатий по ходу прокатки, ростом упрочнения металла и усилий прокатки к концу обжимной зоны, растрескиванием труб из-за чрезмерного обжатия наклепанного металла.

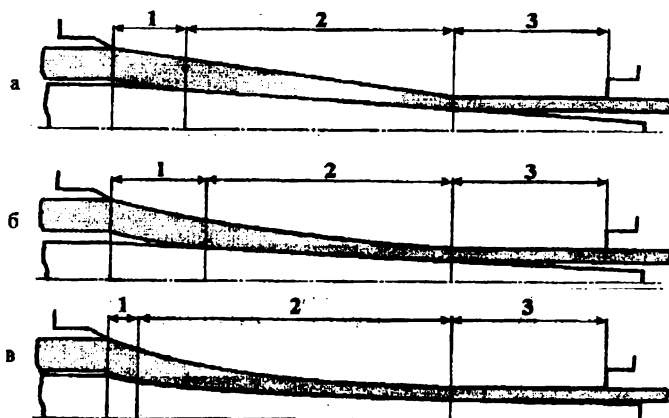


Рис. 4.8. Поколения калибровок: первое (а); второе (б); третье (в);
1 – зона редуцирования; 2 – участок обжатия; 3 – калибрующий участок

Для калибровок *второго поколения* (рис. 4.8, б) характерны переменная конусность развертки ручья и постоянная конусность оправки. Первые калибровки этого типа разработаны в конце 50-х – начале 60-х годов и широко используются до сих пор. Эти калибровки позволили повысить эффективность процесса ХПТ путем обеспечения режима обжатий, соответствующего изменению свойств металла при повышении деформации (главным образом, упрочнения). Типичные представители этих калибровок – МИСиС [7] и НИТИ-НТЗ [14]. Общие признаки этих калибровок – падающий режим относительных обжатий по ходу прокатки, наличие зоны свободного редуцирования и использование оправки с прямолинейной образующей. По каждому признаку выявились недостатки. Так, свободное редуцирование

отличается неблагоприятной схемой напряженного состояния, вызывает нежелательное утолщение стенки, а при прокатке толстостенных труб на внутренней поверхности труб образуются складки, которые в дальнейшем преобразуются в продольные трещины. Прокатка на конической оправке приводит к противоречию между производительностью и точностью труб. Увеличение подачи ведет к росту производительности, так как увеличивается линейное смещение. Но с другой стороны, увеличение линейного смещения уменьшает коэффициент полировки, что снижает точность труб по диаметру. Кроме того, ухудшается и точность толщины стенки труб, так как с оправки сходит участок рабочего конуса, отстоящий от пережима на значительном расстоянии. Для повышения точности труб необходимо уменьшать конусность оправки и ручья вблизи пережима, однако при линейной образующей оправки это приводит к увеличению зоны редуцирования, недостатки которой отмечены выше.

Калибровки второго поколения разрабатывались в отсутствие мощной вычислительной техники и предназначены для выполнения расчетов вручную с применением вспомогательных графиков или таблиц. При этом для преодоления математических трудностей, возникающих при решении дифференциальных уравнений (подробнее об этом см. в [15]), авторы прибегали к определенным упрощениям, что приводило к искажению заданных режимов обжатий.

Для устранения указанных недостатков и повышения качества труб были разработаны калибровки *третьего поколения* (рис. 4.8, в), отличающиеся переменной конусностью ручья и оправки. Оправка в этом случае называется криволинейной или вогнутой, хотя известны калибровки с выпуклой и вогнуто-выпуклой образующей оправки (см., например, АС СССР № 659216, БИ № 16, 1979 и № 761043, БИ № 33, 1980). Построение согласованных профилей калибра и оправки, удовлетворяющих определенным граничным условиям и критериям, представляет собой

довольно сложную математическую задачу из области функционального анализа, разрешимую только с помощью ЭВМ. Поэтому разработка таких калибровок стала возможной с появлением ЭВМ с середины 70-х годов и развивается более 30 лет. Представителями этих калибровок являются калибровка УралНИТИ (В.Г.Миронов [8]), калибровки, разработанные на Украине – КПО [5], калибровки фирмы Mannesmann и др.

В упомянутых выше калибровках поперечное сечение трубы считается идеально круглым. Калибровки, где рассматривается некруглое поперечное сечение (утонение–утолщение в области выпусков калибра) называются калибровками *четвертого поколения*. Однако за неимением надежных методик расчета формоизменения эти калибровки не получили еще значительного развития.

4.3.1. Расчет длины рабочих участков

На первом этапе расчета калибровки определяют длину участков рабочего конуса, для этого строят развертку калибра и рабочий конус (рис. 4.1). В настоящее время используют различные типы калибров (рис.4.9).

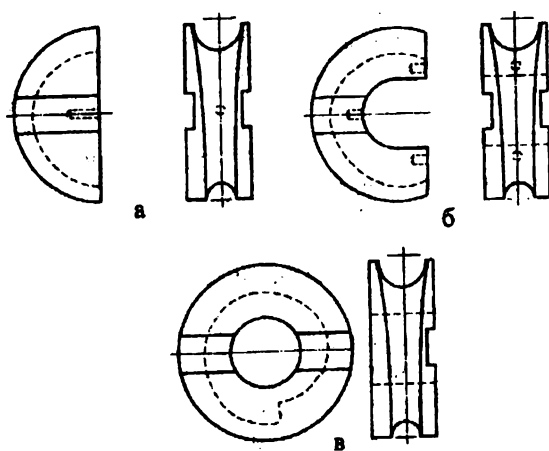


Рис. 4.9. Типы калибров станков ХПТ:
а – полудисковые; б – подковообразные; в – кольцевые

Подковообразные и кольцевые калибры – более современные, так как имеют большой угол рабочего участка (до 320°) и обеспечивают более равномерное распределение усилий по длине рабочего конуса по сравнению с полудисковыми.

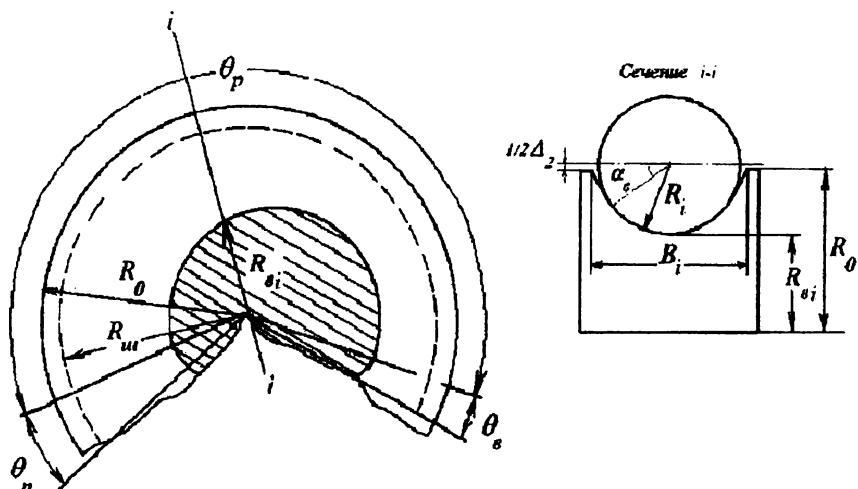


Рис. 4.10. Рабочий участок ручья калибров

Несмотря на различную форму, ручей калибров можно представить в общем виде (рис. 4.10) состоящим из трех основных участков:

- холостого с центральным углом θ_n , на котором происходит подача заготовки (зев подачи);
- рабочего с центральным углом θ_p , на котором происходит деформация трубы;
- холостого с центральным углом θ_v , на котором происходит кантовка трубы (зев поворота).

Суммарный центральный угол ручья калибра равен сумме перечисленных углов,

$$\theta_{\Sigma} = \theta_n + \theta_p + \theta_v,$$

и является углом разворота валка за прямой или обратный ход клетки.

Длины участков ручья рассчитывают по радиусу ведущей шестерни $R_{ш}$ (для расчета фактических размеров участков рабочего конуса) и по радиусу

реборды R_0 (для разметки и контроля размеров ручья при его изготовлении).

Длина участков по радиусу ведущей шестерни:

$$\ell_b = \theta_b R_{ш};$$

$$\ell_p = \theta_p R_{ш};$$

$$\ell_n = \theta_n R_{ш}.$$

Длина участков по радиусу реборды:

$$\ell'_b = \theta_b R_0;$$

$$\ell'_p = \theta_p R_0;$$

$$\ell'_n = \theta_n R_0.$$

Длина участков связана соотношением:

$$\ell_i = \ell'_i R_{ш}/R_0.$$

Сумма длин участков по радиусу ведущей шестерни равна длине хода клетки:

$$L_{кл} = \ell_b + \ell_p + \ell_n = (\theta_n + \theta_p + \theta_b) R_{ш} = \theta_{\Sigma} R_{ш}. \quad (4.44)$$

Для расчета калибровки важно определить длину рабочего участка, которая находится из формулы (4.44):

$$\ell_p = L_{кл} - \ell_b - \ell_n, \quad (4.45)$$

где слагаемые обычно известны из технической характеристики станов (табл. 2.1).

В продольном сечении (рис. 4.10) ручей калибра описан переменным радиусом по вершине калибра:

$$R_{bi} = R_0 - R_i. \quad (4.46)$$

В поперечном i -м сечении (рис. 4.10) калибр имеет круглую часть, описанную радиусом R_i , соответствующим радиусу прокатываемой трубы в данном сечении, и выпуски, ограниченные углом α_b . Наличие выпусков обеспечивает ширину калибра B_i , большую, чем диаметр $D_i = 2R_i$. Разность ширины и диаметра калибра называется развалкой, см. (4.2).

Для построения развертки калибра по линии зацепления ведущей шестерни с зубчатой рейкой переходят от угловой координаты θ к продольной (осевой) $x = \theta R_{ш}$. Начало координат располагают в начале зоны обжатия трубы (зоны редуцирования). Совмещая развертку калибра с

оправкой, строят рабочий конус прокатки (см. рис. 4.1). Как отмечалось выше, рабочий конус длиной l_p (рассчитывается по формуле (4.45)) состоит из участков редуцирования $l_{ред}$, обжатия $l_{обж}$ и калибровки l_k .

Длина калибрующего участка рассчитывается в зависимости от линейного смещения по формуле (4.3). Зона редуцирования в некоторых методиках расчета может не рассматриваться.

Математически задача расчета калибровки сводится к построению кривых (уравнений) образующих калибра и оправки на обжимном участке, удовлетворяющих граничным условиям и некоторым критериям. При этом сечение трубы считается идеально круглым, не зависящим от угловой координаты.

4.3.2. Особенности калибровки оправки

Образующая оправки описывается монотонно убывающей кривой $d(x)$, удовлетворяющей граничным условиям:

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0 & \quad d(0) = d_y; \\ \text{при } x = l_0 & \quad d(l_0) = d_n, \end{aligned}$$

где d_y и d_n – диаметры цилиндрического участка оправки и в сечении пережима соответственно (рис. 4.11).

Относительный перепад диаметров на обжимном участке называется средней конусностью оправки:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{d_y - d_n}{2l_0}.$$

Уравнение оправки с прямолинейной образующей:

$$d(x) = d_y - 2x \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.47)$$

Уравнение оправки с вогнутой образующей может быть описано квадратичной параболой согласно В. Г. Миронову [8]:

$$d(x) = d_y + a \Delta d \left(\frac{x}{l_0} \right)^2 - (a + 1) \frac{x \Delta d}{l_0}, \quad (4.48)$$

где $a = 0,75 \dots 0,85$ – параметр кривизны оправки; $\Delta d = d_y - d_n$ – максимальный перепад диаметра оправки на обжимном участке.

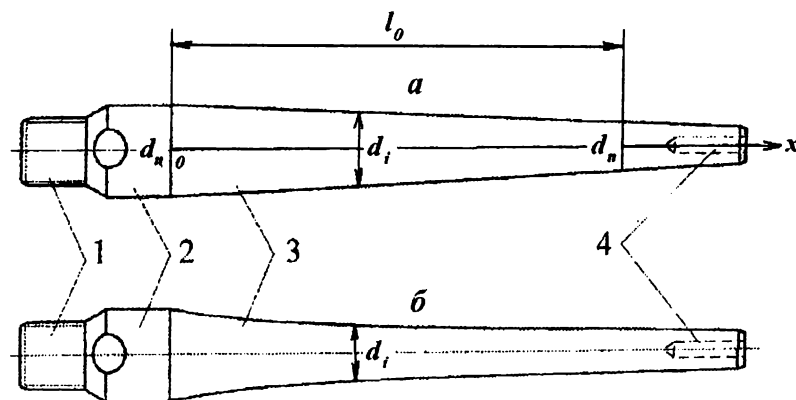


Рис. 4.11. Оправки станков ХПТ: с прямолинейной образующей (а); с криволинейной вогнутой образующей (б):

- 1 – хвостовик с резьбой для крепления к оправочному стержню;
- 2 – цилиндрическая нерабочая часть; 3 – рабочий конический участок;
- 4 – отверстие для крепления удлинителя

При $a=0$ уравнение преобразуется в уравнение прямой линии (4.47).

Очевидно, что оправка с прямолинейной образующей имеет постоянную конусность, а оправка с криволинейной образующей – переменную. Причем уменьшающаяся по ходу прокатки конусность позволяет повысить точность труб за счет минимальной конусности в конце рабочего участка и уменьшить зону редуцирования благодаря увеличению конусности в начале рабочего участка.

4.3.3. Методики расчета калибровок

Рассмотрим три наиболее распространенные в уральском регионе методики.

Исходные данные для расчета калибровок: марка стали (сплава); проход

прокатки $D_0 \times S_0 \rightarrow D_T \times S_T$ ($D_0 \times S_0$ – исходные размеры; $D_T \times S_T$ – конечные размеры, мм); типоразмер стана выбирается в зависимости от D_T ; технические характеристики стана: длина хода клетки $L_{кл}$; за период подачи ℓ_n ; за период поворота ℓ_b ; подача m (табл. 2.1.).

Величина подачи может быть определена по рекомендуемым величинам линейных смещений $m\mu$ (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Рекомендуемые линейные смещения $m\mu$ при ХПТ, мм

Группы сталей и сплавов	ХПТ-32	ХПТ-55	ХПТ-75(90)
Углеродистые ($C < 0,35\%$) и низколегированные стали	36...48	38...52	46...60
Углеродистые ($C > 0,35\%$) и легированные стали	32...45	36...50	42...55
ШХ 15	–	34...46	38...50
Коррозионно-стойкие стали	28...40	32...45	38...50
Сплавы на основе меди:			
латуни	55...70	60...85	120...140
бронзы	40...50	30...40	40...60
Сплавы на основе титана	24...36	26...40	26...40
Сплавы на основе циркония	24...38	20...32	20...32

В производственных условиях могут сложиться несколько иные и более конкретные рекомендации, поэтому при выборе режимов холодной прокатки для конкретного цеха лучше обращаться к технологическим инструкциям.

4.3.3.1. Методика НИТИ-НТЗ

Особенности этой методики: небольшой зазор Δ_1 (рис. 4.12), который назначается по рекомендациям табл. 4.2.

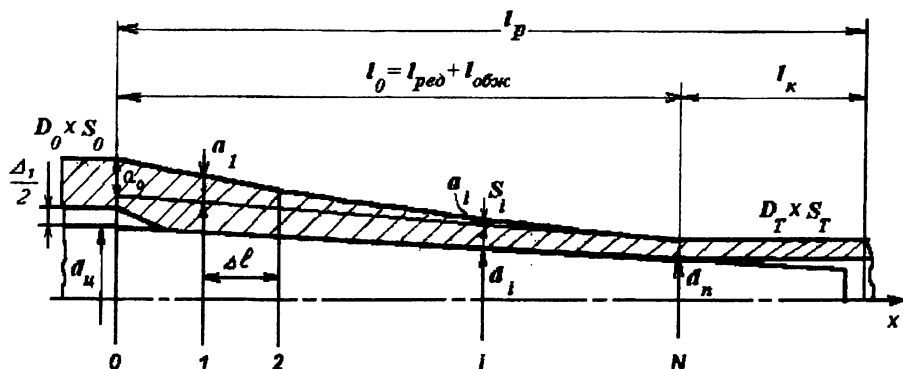


Рис. 4.12. Схема для расчета калибровки по методике НИТИ-НТЗ

Таблица 4.2

Величины рекомендуемых зазоров для введения оправки Δ_1 и между ребрами калибров Δ_2 , мм

Типоразмер стана	ХПТ-32		ХПТ-55		ХПТ-75 (90)		
Толщина стенки заготовки S_0	< 2,5	$\geq 2,5$	< 4,0	$\geq 4,0$	< 4,0	4,0...8,0	> 8,0
Зазор Δ_1	$\geq 1,5$	$\geq 2,0$	$\geq 2,0$	$\geq 2,5$	2,5	3,0	3,5
Толщина стенки готовой трубы S_1	< 0,8	> 0,8	< 1,2	> 1,2	< 1,5		> 1,5
Зазор Δ_2	0,05...0,3	0,05...0,6	0,1...0,4	0,1...1,0	0,2...0,7		0,3...1,2

Вследствие малого зазора – значительная конусность оправки lga и малая зона редуцирования, которая специально не рассматривается. Количество контрольных сечений N выбирается так, чтобы длина первого участка была больше зоны редуцирования. Для расчета толщины стенки на

рабочем конусе строят вспомогательную прямую, параллельную образующей оправки на расстоянии от нее, равном конечной толщине стенки S_T . Тогда толщина стенки в i -м сечении будет $S_i = S_T + a_i$, где a_i – утолщение стенки, которое определяется заданным режимом истинных относительных обжатий $f(x) = \Delta S_i / S_i$, где ΔS_i определяется по формуле (4.10). Требования к функции $f(x)$ сформулированы в разделе 4.1.

В данной методике этот режим задается параболической функцией:

$$f(x) = A + Bx^2, \quad (4.49)$$

где A, B – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Вид зависимостей $f(x)$ для различных методик представлен на рис. 4.13.

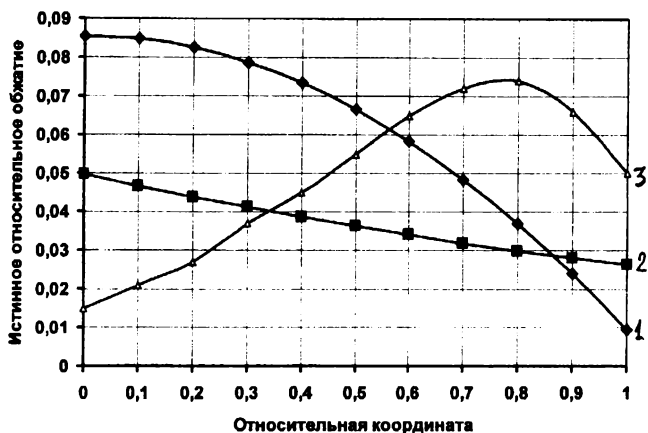


Рис. 4.13. Распределение истинных относительных обжатий для различных методик: 1 – НИТИ-НТЗ; 2 – МИСиС; 3 – УралНИТИ

Функция (4.49) не удовлетворяет условию вогнутости (4.14).

Область применения: равномерный режим обжатий с малым редуцированием позволяет использовать эту методику для прокатки труб из малопластичных сталей и сплавов (высокоуглеродистых сталей типа 45, легированных сталей ШХ 15, 30 ХГСА, 40Х и др.).

Расчеты проводятся в следующем порядке (см. рис. 4.12).

1. Длина рабочего конуса $l_p = L_{\text{кл}} - \ell_n - \ell_v$.

2. Коэффициент вытяжки $\mu_\Sigma = \frac{s_0(D_0 - s_0)}{s_T(D_T - s_T)}$.

3. Длина калибрующего участка $l_k = k_n m \mu_\Sigma$,

где $k_n = 2...3$ – коэффициент полировки, равный числу обжатию объема подачи на калибрующем участке.

4. Суммарная длина участков обжатия и редуцирования

$$l_0 = l_{\text{обж}} + l_{\text{ред}} = l_p - l_k.$$

5. Диаметр оправки в сечении пережима $d_n = D_T - 2S_T$.

6. Выбор количества контрольных сечений N :

для стана ХПТ-32 $N=5$;

ХПТ-55 $N=7$;

ХПТ-75(90) $N=9$.

7. Расчет длины контрольного участка: $\Delta l = \frac{l_0}{N}$.

8. Координаты контрольных сечений $i = 1...N$:

абсолютные $x_i = i\Delta l$ и относительные $\frac{x_i}{l_0}$.

9. Диаметр цилиндрического участка оправки

$$d_u = D_o - 2S_o - \Delta_1,$$

где $\Delta_1 = 2...8$ мм – зазор для введения оправки, выбирается по табл. 4.2.

10. Конусность оправки $\text{tg} \alpha = \frac{d_u - d_n}{2l_0}$.

11. Расчет диаметров оправки в контрольных сечениях:

$$d_i = d_u - 2x_i \text{tg} \alpha.$$

12. Вспомогательная величина $a_0 = S_0 - S_T + \frac{\Delta_1}{2}$.

13. Выбор параметров $\frac{a_i}{a_0}$ для каждого сечения – по табл. 4.3.

14. Расчет толщины стенки в каждом сечении:

$$S_i = S_T + a_i.$$

15. Расчет диаметров калибра по сечениям:

$$D_i = d_i + 2S_i.$$

Таблица 4.3

Выбор параметров для расчета толщины стенки в методике НИТИ-НТЗ

Номер сечения i	ХПТ-32		ХПТ-55		ХПТ-75(90)	
	x_i/l_0	a_i/a_0	x_i/l_0	a_i/a_0	x_i/l_0	a_i/a_0
0	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000
1	0,200	0,440	0,143	0,585	0,110	0,680
2	0,400	0,195	0,286	0,330	0,220	0,430
3	0,600	0,075	0,429	0,175	0,330	0,270
4	0,800	0,015	0,571	0,090	0,440	0,170
5	1,000	0,000	0,714	0,040	0,560	0,100
6	–	–	0,857	0,010	0,670	0,050
7	–	–	1,000	0,000	0,780	0,020
8	–	–	–	–	0,890	0,005
9	–	–	–	–	1,000	0,000

16. Развалка во входном сечении $i = 0$, $x_0 = 0$:

$$\Delta e_0 = 2mtg\beta_1 + \Delta_1 + 1,0 \text{ мм},$$

где $2tg\beta_1 = \frac{D_0 - D_1}{\Delta l}$ – конусность развертки гребня ручья на первом участке ($i=1$).

17. Развалка в выходном сечении $i = N$, $x_N = l_0$:

$$\Delta\epsilon_N = 2m\mu_{\Sigma}\operatorname{tg}\alpha + \Delta_2 + 0,1 \text{ мм},$$

где Δ_2 – зазор между ребрами калибров выбирается по табл. 4.2. Развалка на калибрующем участке равна $\Delta\epsilon_N$.

18. Развалка в промежуточных сечениях рассчитывается линейной интерполяцией:

$$\Delta\epsilon_i = \Delta\epsilon_o - \frac{x_i}{l_o}(\Delta\epsilon_o - \Delta\epsilon_N).$$

Если $\Delta\epsilon_N \geq \Delta\epsilon_o$, принимается во всех сечениях $\Delta\epsilon_i = \Delta\epsilon_N$.

19. Ширина калибра

$$B_i = D_i + \Delta\epsilon_i.$$

Строится итоговая таблица.

Таблица 4.4

Результаты расчета калибровки по методу НИТИ-НТЗ, мм

Номер сечения i	Координаты сечения x_i	Диаметр оправки d_i	Толщина стенки S_i	Диаметр калибра D_i	Развалка калибра $\Delta\epsilon_i$	Ширина калибра B_i
0	0	$d_{\text{ц}}$	S_0	D_0	$\Delta\epsilon_0$	B_0
1	Δl	d_1	S_1	D_1	$\Delta\epsilon_1$	B_1
2	$2\Delta l$	d_2	S_2	D_2	$\Delta\epsilon_2$	B_2
.
.
.
N	l_0	d_n	S_T	D_T	$\Delta\epsilon_N$	B_N

Пример 5. Расчет калибровки по методике НИТИ-НТЗ.

Исходные данные для расчета калибровки: проход прокатки $45 \times 5 \rightarrow 25 \times 2,5$ мм; типоразмер стана – ХПТ-32; технические характеристики стана (табл. 2.1): длина хода клетки $L_{\text{кл}} = 452$ мм; за период подачи $\ell_n = 26$ мм; за период поворота $\ell_o = 30$ мм; подача $m = 10$ мм; коэффициент полировки $k_n = 2,5$.

Расчеты производятся в следующем порядке.

1. Длина рабочего конуса $l_p = L_{\text{кл}} - \ell_n - \ell_g = 452 - 26 - 30 = 396$ мм.

2. Коэффициент вытяжки $\mu_\Sigma = \frac{s_0(D_0 - s_0)}{s_T(D_T - s_T)} = \frac{5(45 - 5)}{2,5(25 - 2,5)} = 3,56$.

3. Длина калибрующего участка $l_k = k_n m \mu_\Sigma = 2,5 \times 10 \times 3,56 = 89$ мм.

4. Суммарная длина участков обжатия и редуцирования

$$l_0 = l_p - l_k = 396 - 89 = 307 \text{ мм.}$$

5. Диаметр оправки в сечении пережима $d_n = D_T - 2S_T = 25 - 2 \times 2,5 = 20$ мм.

6. Выбор количества контрольных сечений N :

для стана ХПТ-32 $N=5$.

7. Расчет длины контрольного участка: $\Delta l = \frac{l_0}{N} = \frac{307}{5} = 61,4$ мм.

8. Координаты контрольных сечений $i = 1 \dots 5$ приведены в табл. 4.5.

9. Диаметр цилиндрического участка оправки

$$d_u = D_o - 2S_o - \Delta_1 = 45 - 2 \times 5 - 3 = 32 \text{ мм,}$$

где $\Delta_1 = 3$ мм – зазор для введения оправки, выбран по табл. 4.2.

10. Конусность оправки $\text{tg} \alpha = \frac{d_u - d_n}{2l_0} = \frac{32 - 20}{2 \cdot 307} = 0,0195$.

11. Диаметры оправки в контрольных сечениях приведены в табл. 4.5.

Например, в контрольном сечении $i=3$:

$$d_3 = 32 - 2 \cdot 184,2 \cdot 0,0195 = 24,82 \text{ мм.}$$

12. Вспомогательная величина $a_0 = S_0 - S_T + \frac{\Delta_1}{2} = 5 - 2,5 + \frac{3}{2} = 4$ мм.

13. Выбор параметров $\frac{a_i}{a_0}$ для каждого сечения – по табл. 4.3 для стана

ХПТ-32.

14. Расчет толщины стенки в каждом сечении, мм:

$$S_1 = 2,5 + 0,440 \times 4 = 4,26;$$

$$S_2 = 2,5 + 0,195 \times 4 = 3,28;$$

$$S_3 = 2,5 + 0,075 \times 4 = 2,80;$$

$$S_4 = 2,5 + 0,015 \times 4 = 2,56;$$

$$S_5 = S_T = 2,5.$$

15. Результаты расчета диаметров калибра по сечениям приведены в табл. 4.5. Например, в контрольном сечении $i=3$:

$$D_3 = d_3 + 2S_3 = 24,82 + 2 \times 2,80 = 30,42 \text{ мм.}$$

16. Конусность развертки гребня ручья на первом участке ($i=1$):

$$2tg\beta_1 = \frac{D_0 - D_1}{\Delta l} = \frac{45 - 38,07}{61,4} = 0,113.$$

Развалка во входном сечении $i = 0$, $x_0 = 0$:

$$\Delta\sigma_o = 10 \cdot 0,113 + 3 + 1,0 = 5,13 \text{ мм.}$$

17. Развалка в выходном сечении:

$$\Delta\sigma_5 = 2 \cdot 10 \cdot 3,56 \cdot 0,0195 + 1 + 0,1 = 2,50 \text{ мм,}$$

где $\Delta_2=1$ мм – зазор между ребрами калибров, выбран по табл. 4.2.

18. Развалка в промежуточных сечениях рассчитывается линейной интерполяцией:

$$\Delta\sigma_1 = 5,13 - \frac{61,4}{307} (5,13 - 2,50) = 4,60 \text{ мм;}$$

$$\Delta\sigma_2 = 5,13 - \frac{122,8}{307} (5,13 - 2,50) = 4,08 \text{ мм;}$$

$$\Delta\sigma_3 = 5,13 - \frac{184,2}{307} (5,13 - 2,50) = 3,55 \text{ мм;}$$

$$\Delta\sigma_4 = 5,13 - \frac{245,6}{307} (5,13 - 2,50) = 3,02 \text{ мм.}$$

19. Результаты расчета ширины калибра приведены в табл. 4.5.

Строится итоговая таблица.

Результаты расчета калибровки по методу НИТИ-НТЗ, мм

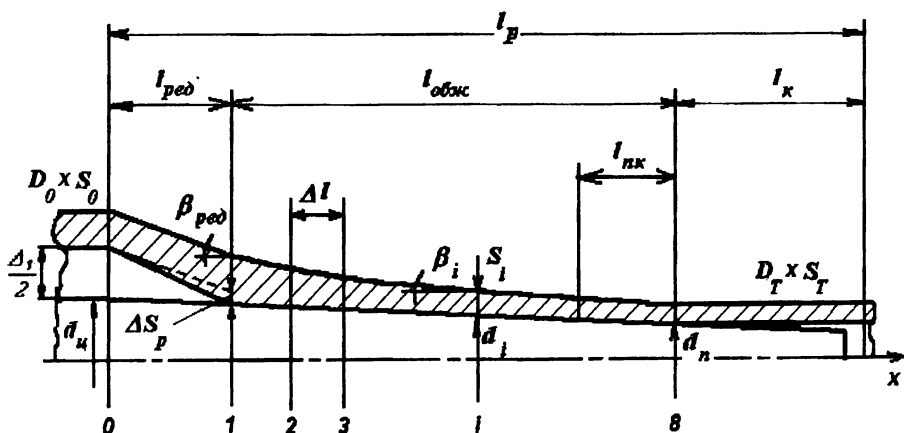


Рис. 4.14. Схема для расчета калибровки по методике МИСиС

Особенности этой методики (рис. 4.14): большой зазор Δ_1 , который образуется благодаря малой конусности оправки, задаваемой по рекомендациям авторов (табл. 4.6). Для этой калибровки характерна большая

зона редуцирования, которая выделяется в самостоятельный участок, и рассчитывается утолщение стенки. В данной методике режим истинных обжатий (4.12) задается экспоненциальной функцией:

$$f(x) = Ae^{-n_2 \frac{x}{l_0}}, \quad (4.50)$$

где $A, n_2 = 0,64$ – коэффициенты; $l_0 = l_{\text{обж}} + l_{\text{ред}}$ – длина обжимного участка.

Вид зависимости (4.50) представлен на рис. 4.13, кривая 2. Видно, что она не удовлетворяет условию (4.15), что является одним из недостатков рассматриваемой методики. Избыточное обжатие на предкалибрующем участке может вызвать продольную разностенность. Для исправления этого недостатка при прокатке труб повышенной точности и тонкостенных ($S_T < 1,5$ мм) автор методики Ю. Ф. Шевакин [7] рекомендует введение прямолинейного предотделочного (предкалибрующего) участка длиной $l_{nk} = (1 \dots 1,4)m\mu_\Sigma$ (рис. 4.14), конусность которого равна конусности оправки. При прокатке труб промежуточных размеров и толстостенных необходимость в этом участке отпадает.

Для этой методики характерен более интенсивный режим обжатий и большое редуцирование по наружному диаметру с утолщением стенки, поэтому ее рекомендуется применять для пластичных сталей и сплавов типа малоуглеродистых (сталь 10) и коррозионно-стойких (типа X18H10T), а также для некоторых медных, титановых и других сплавов.

Начало расчета (п.п. 1...5) совпадает с расчетом по методике НИТИ-ИТЗ. Далее основное отличие в том, что конусность оправки $2tg\alpha$ назначается по рекомендациям Ю. Ф. Шевакина [7], приведенным в табл. 4.6. Количество контрольных сечений на обжимном участке для всех случаев $N=7$.

Расчет продолжается в следующем порядке.

6. Выбор конусности оправки $2tg\alpha$ по табл. 4.6.

Таблица 4.6

Рекомендуемые значения конусности оправок

Типоразмер стана	ХПТ-32		ХПТ-55			ХПТ-75 (90)			
Разность диаметров заготовки и готовой трубы $(D_0 - D_T)$, мм	<13	>13	<14	14...18	>18	12...16	17...22	23...28	>29
$2tg\alpha$	0,01... 0,015	0,02	0,01	0,015	0,02 ... 0,03	0,01	0,02	0,03	0,04

7. Диаметр цилиндрического участка оправки:

$$d_{\text{ц}} = d_n + 2tg\alpha \cdot l_0.$$

8. Зазор для введения оправки $\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - d_{\text{ц}}$.

9. Расчет длины зоны редуцирования:

$$l_{\text{ред}} = \frac{\Delta_1}{2tg\beta_{\text{ред}}(1 + 1,5 \frac{S_0}{D_0}) - 2tg\alpha},$$

где $2tg\beta_{\text{ред}} = 0,2$ – конусность развертки в зоне редуцирования.

10. Длина контрольного участка

$$\Delta l = \frac{l_{\text{обж}}}{7}; \quad l_{\text{обж}} = l_0 - l_{\text{ред}}.$$

11. Координаты контрольных сечений

$$x_i = l_{\text{ред}} + (i - 1)\Delta l.$$

12. Диаметры оправки в контрольных сечениях

$$d_i = d_{\text{ц}} - 2x_i tg\alpha.$$

13. Расчет утолщения стенки в зоне редуцирования

$$\Delta S_p = 0,75 \frac{S_0}{D_0} l_{\text{ред}} \cdot 2tg\beta_{\text{ред}}.$$

14. Толщина стенки в конце зоны редуцирования в сечении $i=1$:

$$S_1 = S_0 + \Delta S_p.$$

15. Расчет толщины стенки в контрольных сечениях:

$$S_i = S_1 \left[\frac{\frac{S_1}{S_T} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{i-1}{7}}) + 1 \right]^{-1}$$

16. Расчет диаметров калибра:

$$D_i = d_i + 2S_i.$$

17. Развалка во входном сечении при $x=0$:

$$\Delta e_0 = 2,6tg\beta_{\text{ред}} \cdot m.$$

18. Конусность развертки в контрольных сечениях ($i = 2...8$):

$$2tg\beta_i = \frac{D_{i-1} - D_i}{\Delta l},$$

причем $2tg\beta_1 = 2tg\beta_{\text{ред}}.$

19. Текущий коэффициент вытяжки $\mu_i = \frac{S_0(D_0 - S_0)}{S_i(D_i - S_i)}.$

20. Развалка в остальных сечениях ($i = 1...8$):

$$\Delta e_i = 1,4m\mu_i(2tg\beta_i - 2tg\alpha).$$

21. Ширина калибра

$$B_i = D_i + \Delta e_i.$$

Результаты расчетов заносятся в итоговую таблицу.

Таблица 4.7

Результаты расчета калибровки по методу МИСиС, мм

Номер сечения i	Координаты сечения x_i	Диаметр оправки d_i	Толщина стенки S_i	Диаметр калибра D_i	Развалка калибра $\Delta\vartheta_i$	Ширина калибра B_i
0	0	$d_{\text{ц}}$	S_0	D_0	$\Delta\vartheta_0$	B_0
1	$l_{\text{ред}}$	d_1	S_1	D_1	$\Delta\vartheta_1$	B_1
2	$l_{\text{ред}} + \Delta l$	d_2	S_2	D_2	$\Delta\vartheta_2$	B_2
3	$l_{\text{ред}} + 2\Delta l$	d_3	S_3	D_3	$\Delta\vartheta_3$	B_3
.
.
8	l_0	d_n	S_T	D_T	$\Delta\vartheta_8$	B_8

Пример 6. Расчет калибровки по методике МИСиС. Исходные данные и начало расчета (п.п. 1...5) совпадают с расчетом по методике НИТИ-НТЗ. Далее вычисления производятся в следующем порядке.

6. Выбор конусности оправки по табл. 4.6: $2tg\alpha = 0,02$.

7. Диаметр цилиндрического участка оправки:

$$d_{\text{ц}} = d_n + 2tg\alpha \cdot l_0 = 20 + 0,02 \times 307 = 26,14 \text{ мм.}$$

8. Зазор для введения оправки $\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - d_{\text{ц}} = 45 - 2 \times 5 - 26,14 = 8,86 \text{ мм.}$

9. Расчет длины зоны редуцирования:

$$l_{\text{ред}} = \frac{\Delta_1}{2tg\beta_{\text{ред}}(1 + 1,5 \frac{S_0}{D_0}) - 2tg\alpha} = \frac{8,86}{0,2(1 + 1,5 \frac{5}{45}) - 0,02} = 41,52 \text{ мм.}$$

10. Длина контрольного участка

$$\Delta l = \frac{307 - 41,52}{7} = 37,94 \text{ мм.}$$

11. Координаты контрольных сечений приведены в итоговой табл. 4.8.

Например, $x_3 = 41,52 + 2 \cdot 37,94 = 117,4 \text{ мм.}$

12. Диаметры оправки в контрольных сечениях приведены в итоговой

табл. 4.8. Например, $d_3 = 26,14 - 117,4 \cdot 0,02 = 23,79$ мм.

13. Расчет утолщения стенки в зоне редуцирования:

$$\Delta S_p = 0,75 \cdot \frac{5}{45} \cdot 41,52 \cdot 0,2 = 0,69 \text{ мм}.$$

14. Толщина стенки в конце зоны редуцирования в сечении $i=1$:

$$S_1 = 5 + 0,69 = 5,69 \text{ мм}.$$

15. Значения толщины стенки в контрольных сечениях приведены в итоговой табл. 4.8. Например,

$$S_3 = 5,69 \cdot \left[\frac{\frac{5,69}{5} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{3-1}{7}}) + 1 \right]^{-1} = 3,92 \text{ мм}.$$

16. Результаты расчета диаметров калибра в контрольных сечениях приведены в итоговой табл. 4.8. Например,

$$D_3 = 23,79 + 2 \times 3,92 = 31,64 \text{ мм}.$$

17. Развалка во входном сечении при $x=0$:

$$\Delta \vartheta_0 = 2,6 \times 0,1 \times 10 = 2,6 \text{ мм}.$$

18. Конусность развертки в контрольном сечении ($i = 3$):

$$2tg\beta_3 = \frac{D_2 - D_3}{\Delta l} = \frac{33,76 - 31,64}{37,94} = 0,056.$$

Аналогично рассчитываются конусности для других сечений.

19. Текущий коэффициент вытяжки в контрольном сечении ($i = 3$):

$$\mu_3 = \frac{5(45 - 5)}{3,92(31,64 - 3,92)} = 1,84. \text{ Аналогично рассчитываются коэффициенты}$$

вытяжки в остальных сечениях.

20. Развалка в контрольном сечении ($i = 3$):

$$\Delta \vartheta_3 = 1,4 \cdot 10 \cdot 1,84 \cdot (0,056 - 0,02) = 1,29 \text{ мм}.$$

Аналогично рассчитывается развалка в остальных сечениях.

Таблица 4.8

Результаты расчета калибровки по методу МИСиС, мм

Номер сечения i	Координаты сечения x_i	Диаметр оправки d_i	Толщина стенки S_i	Диаметр калибра D_i	Развалка калибра Δv_i	Ширина калибра B_i
0	0	26,14	5,00	45,00	2,60	47,60
1	41,52	25,31	5,69	36,70	4,51	41,21
2	79,64	24,55	4,61	33,76	1,75	35,51
3	117,40	23,79	3,92	31,64	1,29	32,93
4	155,35	23,04	3,45	29,94	1,02	30,96
5	193,29	22,28	3,12	28,51	0,84	29,35
6	231,23	21,52	2,86	27,24	0,70	27,94
7	269,17	20,76	2,66	26,08	0,61	26,69
8	307,00	20,00	2,50	25,00	0,54	25,54

21. Ширина калибра в контрольном сечении ($i = 3$):

$$B_i = 31,64 + 1,29 = 32,93 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитывается ширина калибра в остальных сечениях.

Результаты расчетов заносятся в итоговую табл. 4.8.

4.3.3.3. Методика УралНИТИ

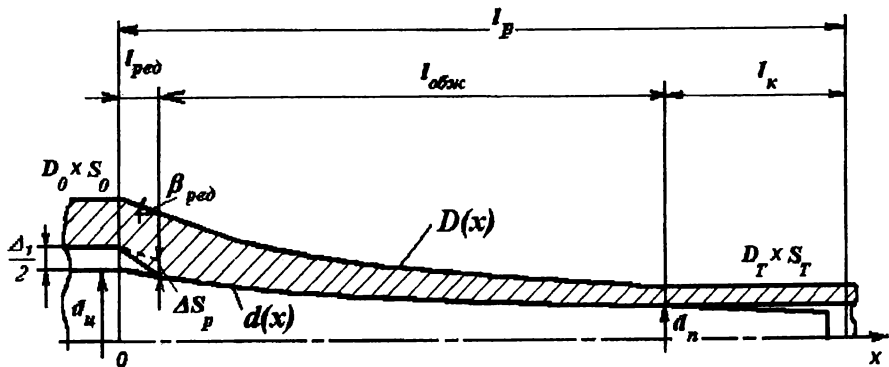


Рис. 4.15. Схема для расчета калибровки по методике УралНИТИ

Отличия этой методики от рассмотренных ранее заключаются в использовании оправки с криволинейной образующей (4.48).

Также в этой методике изначально задается функция образующей рабочего конуса $D(x)$, а толщина стенки – как полуразность наружного и внутреннего диаметров трубы:

$$S(x) = \frac{1}{2}(D(x) - d(x)).$$

Такой подход не позволяет в полной мере управлять режимом обжатия стенки трубы по длине рабочего конуса и, как следствие, распределением усилий на калибры. Расчеты показали [15], что функция истинных обжатий в данном случае имеет куполообразный вид, причем ее максимум смещен к концу обжимного участка (см. рис. 4.13). Аналогичный характер имеет и распределение усилий, что приводит, как и при использовании методики МИСиС, к снижению точности прокатываемых труб. Более подробно с анализом методик расчета калибровок можно познакомиться по учебному пособию [15].

Функция образующей рабочего конуса $D(x)$ строится по трем кривым: квадратичной параболы в зоне редуцирования, кубической параболы в зоне обжатия стенки и прямой линии на калибрующем участке:

$$D(x) = \begin{cases} A_1 + A_2x + A_3x^2 & \text{при } x \in \ell_{\text{ред}}; \\ A_4 + A_5x + A_6x^2 + A_7x^3 & \text{при } x \in \ell_{\text{обж}}; \\ D_T & \text{при } x \in \ell_k, \end{cases}$$

где $A_1 \dots A_7$ – коэффициенты, определяемые из граничных условий.

Приведенные функции, в частности для обеспечения непрерывности образующей рабочего конуса, должны быть согласованы на границах по значению и первой производной. Для определения коэффициентов используются 6 граничных условий:

$$\left\{ \begin{array}{l} D(x) = D_0 \text{ при } x = 0 \Rightarrow A_1 = D_0; \\ D(x) = D_T \text{ при } x = \ell_0; \\ D(x)_{-0} = D(x)_{+0} \text{ при } x = \ell_{\text{ред}}; \\ D'(x)_{-0} = D'(x)_{+0} = 2tg\beta_{\text{ред}} \text{ при } x = \ell_{\text{ред}}; \\ D'(x) = d'(x) \text{ при } x = \ell_0; \\ D(x) = d + 2(s_0 + \Delta s_p) \text{ при } x = \ell_{\text{ред}}, \end{array} \right. \quad (4.51)$$

где символами -0 и $+0$ обозначены значения функции слева и справа от границы; штрихом – первая производная; $tg\beta_{\text{ред}}$ – конусность развертки в конце зоны редуцирования; Δs_p – утолщение стенки в зоне редуцирования, подсчитываемое по формуле из методики МИСиС.

Пятое условие в (4.51) означает равенство углов наклона образующих калибра и оправки в конце зоны обжатия, что обеспечивает минимальную продольную разностенность.

Таким образом, для определения 7 коэффициентов используется 6 граничных условий, то есть калибровка строится с точностью до одного свободного параметра – конусности развертки в конце зоны редуцирования $tg\beta_{\text{ред}}$. Для расчета калибровки авторами разработана программа для ЭВМ [8], где используются элементы оптимизации нахождения свободного параметра, например, по критерию минимального усилия на валки или минимальной продольной разностенности. Предложенная методика в упрощенном варианте использована и в учебном пакете программ [10,12], где параметр $tg\beta_{\text{ред}}$ задается в диалоговом режиме.

4.3.4. Учет упругой деформации клетки и валков

В приведенных методиках расчета калибровки определяется диаметр трубы в данном сечении D_i , который лишь косвенно характеризует размер калибра. При изготовлении калибров обычно задается их глубина, которая в каждом сечении рассчитывается по соотношению (рис. 4.16):

$$H_i = \frac{D_i - \Delta_2}{2}, \quad (4.52)$$

где Δ_2 – зазор между ребрами калибров.

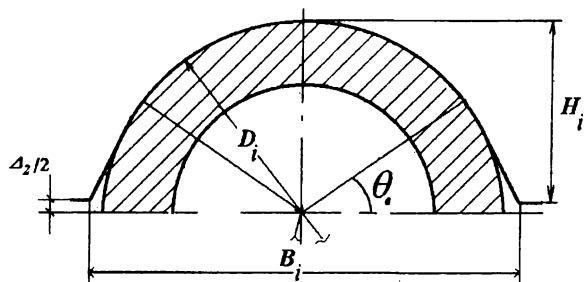


Рис. 4.16. Схема к расчету глубины калибра H_i

Зазор Δ_2 может изменяться по длине рабочего конуса вследствие упругой деформации клетки и валков. На стандартных станах, рассмотренных выше, зазор Δ_2 изменяется мало и может быть задан постоянным по всей длине рабочего конуса в соответствии с табл. 4.2.

В общем случае величина зазора непостоянна, и ее увеличение определяется упругой деформацией, мм, которая может быть рассчитана по данным В. И. Соколовского:

для стана ХПТ-32 $\epsilon_y = 0,0015 P$;

ХПТ-55 $\epsilon_y = 0,0011 P$;

ХПТ-75(90) $\epsilon_y = 0,0009 P$,

где P , кН – усилие на валок в данном сечении рабочего конуса.

Таким образом, фактический зазор

$$\Delta_{2\phi} = \Delta_2 + \epsilon_y$$

и должен учитываться при определении глубины калибра по (4.52).

При отсутствии данных о жесткости клетки величину упругой деформации определяют по замерам реального диаметра трубы на рабочем

конусе и в сравнении с расчетным диаметром по калибровке D_i . Сказанное особенно важно при изготовлении труб повышенной точности.

С целью компенсации упругой деформации калибрующий участок рекомендуется [7] выполнять коническим. В конце калибрующего участка диаметр ручья должен быть больше, чем в начале, на величину упругой деформации валков (рис. 4.17):

$$D'_T - D_T = \varepsilon_y.$$

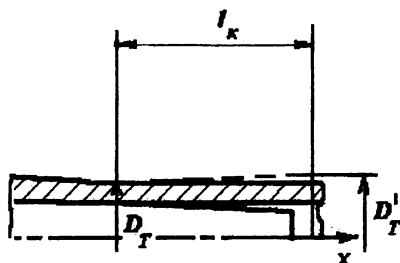


Рис. 4.17. Схема конического калибрующего участка

Упругая деформация валков на калибрующем участке может быть определена по экспериментальным данным [7]:

для стана ХПТ-32 $\varepsilon_y = 0,0008 P$;

ХПТ-55 $\varepsilon_y = 0,0005 P$;

ХПТ-75(90) $\varepsilon_y = 0,0003 P$,

где P , кН – усилие на валок на калибрующем участке, которое может быть определено как среднее по формуле (4.58).

4.4. Расчет силовых параметров

Для каждого i -го поперечного сечения рабочего конуса можно рассчитать усилие металла на валок, осевое усилие на заготовку, момент прокатки при прямом и обратном ходе клетки.

Исходными данными для расчета являются калибровка инструмента, материал трубы, характеристики стана, режимы прокатки.

В связи с трудоемкостью расчетов по сечениям их обычно проводят на ЭВМ, например, с использованием комплекса программ [10–12]. На практике применяют формулы для расчета усредненных усилий прокатки, которые также приведены ниже. По рассчитанным усилиям проверяют технологические и прочностные ограничения.

4.4.1. Расчет усилия металла на валки

Вертикальная составляющая усилия металла на валок при прямом (рис. 4.18) или обратном ходе клетки для i -го поперечного сечения конуса прокатки определяется по выражению

$$P_i = p_i \cdot F_i, \quad (4.53)$$

где p_i – среднее давление металла на валок; F_i – площадь горизонтальной проекции контактной поверхности, определяемая по формулам (4.19), (4.20).

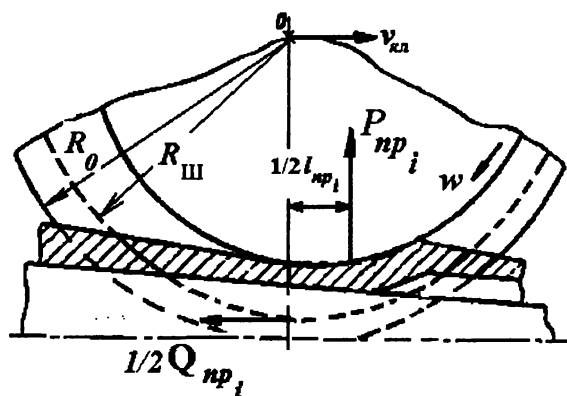


Рис. 4.18. Силы в МОД при прямом ходе клетки

Полное усилие металла на валок при прямом ходе клетки для i -го поперечного сечения конуса прокатки находится из выражения

$$P_{np_i} = p_{np_i} \cdot F_{np_i}. \quad (4.54)$$

Для обратного хода – по выражению

$$P_{обр_i} = p_{обр_i} \cdot F_{обр_i}. \quad (4.55)$$

Все приведенные ниже формулы этого параграфа предложены Ю. Ф. Шевакиным [7].

Среднее давление прокатки при прямом и обратном ходах клетки рассчитывается по формулам:

$$p_{np_i} = \sigma_s \left[\eta_\omega + f \left(\frac{S_0}{S_i} - 1 \right) \cdot \frac{R_{si}}{R_{ш}} \cdot \frac{l_{np_i}}{S_i} \right]; \quad (4.56)$$

$$p_{обр_i} = \sigma_s \left[\eta_\omega + 2f \left(\frac{S_0}{S_i} - 1 \right) \cdot \frac{R_{ш}}{R_{si}} \cdot \frac{l_{обр_i}}{S_i} \right], \quad (4.57)$$

где σ_s – временное сопротивление металла трубы (1.2); $\eta_\omega=1,02...1,08$ – коэффициент, учитывающий схему напряжений; f – коэффициент трения (для сталей и алюминиевых сплавов $f=0,08...0,10$; для меди, латуни и других тяжелых цветных металлов $f=0,06...0,07$); R_{si} – радиус валка по вершине калибра (4.46); S_0 , S_i – исходная и текущая толщина стенки; $R_{ш}$ – радиус начальной окружности ведущей шестерни; l_{np_i} , $l_{обр_i}$ – длина МОД при прямом и обратном ходе клетки (4.16), (4.17).

Из анализа формул (4.56), (4.57), приведенных в [7], следует, что на величину давления оказывают сильное влияние следующие факторы:

- упрочнение в процессе прокатки, определяемое с учетом временного сопротивления по формуле (1.2);
- коэффициент трения;
- показатель изменения неравномерности деформации по длине ручья S_0/S_i ;

- множитель $R_{gi}/R_{ш}$ при прямом ходе клетки, учитывающий влияние диаметра ручья и радиуса ведущей шестерни на сопротивление деформации, так как при одинаковой величине деформации чем больше диаметр ручья (меньше R_{gi}), тем меньше величина относительной развалки и меньше сопротивление деформации. Уменьшение $R_{ш}$ затрудняет истечение металла и тем самым повышает сопротивление деформации. При обратном ходе клетки наблюдается обратная картина, поэтому используется множитель $R_{ш}/R_{gi}$;
- отношение $l_{np(обр)}/S_i$, характеризующее форму очага деформации и отражающее влияние контактных сил трения на величину смещенных объемов в длину и ширину. Чем больше отношение $l_{np(обр)}/S_i$, тем сильнее сопротивление сил трения течению металла по оси прокатки и тем большая часть металла смещается в ширину (в выпуски калибра), что повышает давление на инструмент.

Рост всех перечисленных факторов приводит к повышению давления.

Пример 7. Рассчитаем усилие на валок для сечения $i = 3$ в методике МИСиС (табл. 4.8). В этом сечении имеем следующие размеры: $D_3 = 31,64$ мм; $S_3 = 3,92$ мм; $2tg\beta_3 = 0,056$; $\mu_3 = 1,84$; $2tg\alpha = 0,02$; для стана ХПТ-32 радиус калибра по реборде $R_0 = 150$ мм; радиус ведущей шестерни $R_{ш} = 140$ мм. Коэффициент трения $f = 0,1$.

Расчеты выполняются в следующем порядке.

1. Истинное обжатие по стенке в сечении $i = 3$ рассчитывается по формуле (4.10):

$$\Delta S_3 = 10 \times 1,84 \times (0,028 - 0,01) = 0,33 \text{ мм.}$$

Истинное обжатие за прямой и обратный ход клетки (4.8) и (4.9):

$$\Delta S_{пр3} = 0,7 \times 0,33 = 0,23 \text{ мм;}$$

$$\Delta S_{обр3} = 0,3 \times 0,33 = 0,10 \text{ мм.}$$

2. Расчет длины МОД. Радиус валка по вершине калибра:

$$R_{в3} = R_0 - D_3/2 = 150 - 31,64/2 = 134,18 \text{ мм.}$$

$$l_{np3} = \sqrt{2R_{в3} \cdot \Delta S_{np3}} = \sqrt{2 \cdot 134,18 \cdot 0,23} = 7,86 \text{ мм};$$

$$l_{обp3} = \sqrt{2R_{в3} \cdot \Delta S_{обp3}} = \sqrt{2 \cdot 134,18 \cdot 0,10} = 5,18 \text{ мм.}$$

3. Расчет площади горизонтальной проекции контактной поверхности.

Относительное обжатие поперечного сечения:

$$\varepsilon_3 = \left(1 - \frac{1}{\mu_3}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1}{1,84}\right) \cdot 100\% = 45,7\%.$$

Временное сопротивление металла трубы (сталь 20, табл. 1.3):

$$\sigma_s = \sigma_{s0} + q\varepsilon_3^b = 500 + 5,7 \cdot 45,7^{0,98} = 741,3 \text{ МПа.}$$

Увеличение контактной поверхности за счет сплющивания валков (4.21):

$$\Delta F_3 = 3,9 \cdot 10^{-5} \cdot 741,3 \cdot 31,64 \cdot \left(\frac{3,14 \cdot 150}{8} - \frac{31,64}{6} \right) = 48,8 \text{ мм}^2.$$

Полная площадь контактной поверхности при прямом и обратном ходе клетки (4.19) и (4.20):

$$F_{np3} = 1,25 \times 31,64 \times 7,86 + 48,8 = 359,6 \text{ мм}^2;$$

$$F_{обp3} = 1,25 \times 31,64 \times 5,18 + 48,8 = 253,7 \text{ мм}^2.$$

4. Среднее давление металла на валки при прямом и обратном ходе клетки:

$$p_{np3} = \sigma_s \left[\eta_\omega + f \left(\frac{S_0}{S_3} - 1 \right) \cdot \frac{R_{в3}}{R_{ш}} \cdot \frac{l_{np3}}{S_3} \right] = 741,3 \cdot \left[1,05 + 0,1 \left(\frac{5}{3,92} - 1 \right) \cdot \frac{134,18}{140} \cdot \frac{7,86}{3,92} \right] = 817,6 \text{ МПа};$$

$$p_{обp3} = \sigma_s \left[\eta_\omega + 2f \left(\frac{S_0}{S_3} - 1 \right) \cdot \frac{R_{ш}}{R_{в3}} \cdot \frac{l_{обp3}}{S_3} \right] = 741,3 \cdot \left[1,05 + 0,2 \cdot \left(\frac{5}{3,92} - 1 \right) \cdot \frac{140}{134,18} \cdot \frac{5,18}{3,92} \right] = 834,7 \text{ МПа}$$

5. Усилие металла на валки при прямом и обратном ходе клетки (4.54) и (4.55):

$$P_{np3} = 817,6 \times 359,6 = 294009 \text{ Н} = 294 \text{ кН};$$

$$P_{обp3} = 834,7 \times 253,7 = 211763 \text{ Н} = 211,8 \text{ кН.}$$

Среднее за цикл прокатки усилие можно рассчитать по формуле Ю. Ф. Шевакина [2]:

$$\bar{P}_{ХРТ} = k_{\sigma} \bar{\sigma}_{\varepsilon 50} (D_0 + D_T) \sqrt{t \mu_{\Sigma} (S_0 - S_T) R_{ш} / (\ell_{обж} + \ell_{ред})}, \quad (4.58)$$

где k_{σ} – коэффициент, учитывающий характер упрочнения металла ($k_{\sigma} = 1,42$ для сталей и $1,10 \dots 1,17$ для медных сплавов); $\bar{\sigma}_{\varepsilon 50}$ – временное сопротивление металла при $\varepsilon = 50\%$ (табл. 1.3); остальные обозначения приняты выше.

Пример 8. Рассчитаем по формуле (4.58) усилие прокатки для прохода $45 \times 5 \rightarrow 25 \times 2,5$ мм; типоразмер стана – ХПТ-32; радиус ведущей шестерни $R_{ш} = 140$ мм (табл. 2.1); подача $t = 10$ мм; материал – сталь 45.

Из расчета калибровки инструмента имеем: длина участков рабочего конуса $\ell_{обж} + \ell_{ред} = 307$ мм; $\mu_{\Sigma} = 3,56$.

Определим временное сопротивление стали 45 по табл. 1.3:

$$\sigma_{\varepsilon 50} = 574 + 14,1 \cdot 50^{0,83} = 936,4 \text{ МПа.}$$

Подставим найденные значения в формулу (4.58):

$$\bar{P}_{ХРТ} = 1,42 \cdot 936,4 \cdot (45 + 25) \sqrt{10 \cdot 3,56 \cdot (5 - 2,5) \cdot 140 / 307} = 593 \text{ кН.}$$

4.4.2. Расчет осевых усилий

Осевые усилия возникают вследствие действия сил трения на контактных поверхностях с калибрами. Из теории обработки металлов давлением известно, что напряжения трения τ и скорости скольжения v_s направлены в противоположные стороны (рис. 4.2 и 4.3). Распределение скоростей скольжения на контактной поверхности подробно рассмотрено в параграфе 4.2.2. В зависимости от знака v_s контактная поверхность делится на зоны отставания и опережения. Осевое усилие в i -м МОД при двухвалковой схеме прокатки определяется разностью сил трения в зонах

опережения и отставания:

$$Q_i = 2(T_{\text{ОТ}i} - T_{\text{ОП}i}).$$

Предполагая равномерное распределение напряжений трения по контактной поверхности, последнюю формулу можно записать так:

$$Q_i = 2\tau(F_{\text{ОП}} - F_{\text{ОТ}}).$$

Принимая закон трения по Кулону $\tau = fp$ для уточнения последнего выражения, получим:

$$Q_i = 2fp_i(F_{\text{ОТ}i} - F_{\text{ОП}i}), \quad (4.59)$$

где $f = 0,08 \dots 0,01$ – коэффициент трения; p_i – давление металла на валки (4.56, 4.57); $F_{\text{ОТ}i}, F_{\text{ОП}i}$ – соответственно, площади зон отставания и опережения в i -м МОД.

Из формулы (4.59) видно, что при известном давлении p_i осевое усилие определяется соотношением кинематических зон на контактной поверхности, формулы для расчета которых приведены в п. 4.2.2. При больших скоростях металла и большом опережении $F_{\text{ОТ}i} < F_{\text{ОП}i}$, осевое усилие – сжимающее с отрицательным значением.

При расчете осевого усилия по формуле (4.59) учитывают прямой или обратный ход клетки, а также соотношение радиуса ведущей шестерни и радиуса вала по вершине калибра. Рассмотрим следующие случаи.

Прямой ход клетки, $R_{\text{ш}} > R_g$. Рассчитывается площадь зоны отставания по формулам (4.34) или (4.35) и площадь зоны опережения (4.36).

Прямой ход клетки, $R_{\text{ш}} < R_g$. Всю контактную поверхность занимает зона опережения, и формула (4.59) принимает вид:

$$Q_i = -2fp_iF_i. \quad (4.60)$$

Обратный ход клетки, $R_{\text{ш}} > R_g$. Вначале также рассчитывается площадь зоны отставания по формуле (4.39), затем – площадь зоны опережения по (4.36).

Обратный ход клетки, $R_{ш} < R_{г}$. Рассматривают два случая в зависимости от скорости металла, определяемой текущим коэффициентом вытяжки при обратном ходе клетки (4.40).

При $\mu_{обри} \leq R_{ги} / R_{ш}$ скорость металла невелика, и вся контактная поверхность является зоной отставания:

$$Q_i = 2fp_i F_i. \quad (4.61)$$

При $\mu_{обри} > R_{ги} / R_{ш}$ площадь зоны опережения рассчитывается по формуле (4.42), затем – площадь зоны отставания по формуле (4.43).

Возможность стыковки труб, особенно при обратном ходе клетки, и потери устойчивости трубы в виде «гармошки» проверяется по условию:

$$\frac{|Q_i^{\max}|}{F_0} \leq 0,8\sigma_{0,2}, \quad (4.62)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения прокатываемой заготовки; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести металла заготовки, определяется по табл. 1.3.

Нежелательные явления возможны при невыполнении условия (4.62), так как осевые силы вызывают соответствующие напряжения в заготовке, в том числе на торцах докатываемых труб, когда заготовка, зажата в патроне, толкает докатываемую заготовку. Осевые напряжения при определенных условиях прокатки могут достигать настолько больших величин (соизмеримых с пределом текучести), что торцы заготовок будут сминаться или врезаться друг в друга, вызывая стыковку труб, что может привести к остановке стана.

При использовании формулы (4.62) учитывают также смещение заготовок при их докатке, что вызывает уменьшение площади контакта. Величина смещения определяется зазором между стержнем оправки и внутренним диаметром заготовки. В книге [13] показано, что уменьшение площади контакта с некоторыми допущениями можно оценить как

$$\Delta F_0 = 2\delta D_0 \quad (4.63)$$

где δ – зазор между стержнем оправки и внутренним диаметром заготовки;
 D_0 – наружный диаметр заготовки.

Обычно величина осевого усилия составляет 10–40% от усилия металла на валок и увеличивается при уменьшении толщины стенки:

$$\text{при } S_T > 1 \text{ мм} \quad Q_i = (0,1 \dots 0,15)P_i; \quad (4.64)$$

$$\text{при } S_T \leq 1 \text{ мм} \quad Q_i = (0,25 \dots 0,40)P_i. \quad (4.65)$$

Пример 9. Расчет осевых усилий. Расчет сделаем для сечения $i = 3$ методики МИСиС (табл. 4.8). В этом сечении имеем следующие размеры: $D_3 = 31,64$ мм; $S_3 = 3,92$ мм; $2tg\beta_3 = 0,056$; $\mu_3 = 1,84$; $2tg\alpha = 0,02$; для стана ХПТ-32 радиус калибра по реборде $R_0 = 150$ мм; радиус ведущей шестерни $R_{ш} = 140$ мм. Коэффициент трения $f = 0,1$.

Рассматриваем случай $R_{ш} > R_{сз}$: $140 > 134,18$ мм. Радиус валка по вершине калибра $R_{сз}$ был рассчитан ранее в примере 7. Истинные обжатия за прямой и обратный ход клетки в данном сечении были также рассчитаны в примере 7: $\Delta S_{прз} = 0,23$ мм; $\Delta S_{обрз} = 0,10$ мм.

1. Прямой ход клетки.

$$\text{Угол захвата (4.18): } \theta_3 = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,23}{134,18}} = 0,0586 \text{ рад.}$$

$$\text{Угол нейтрального сечения (4.27): } \omega_3 = 1,7 \sqrt{\frac{(140 - 134,18) \cdot 3,92}{140 \cdot 134,18}} = 0,0592 \text{ рад.}$$

Так как $\theta_3 < \omega_3$, зона отставания – криволинейная трапеция, площадь которой определяется по формуле (4.35).

Угол, определяющий положение радиуса ведущей шестерни (см. составляющие формулы 4.34):

$$\varphi = \arccos\left(\frac{150 - 140}{15,82}\right) = 50,8^\circ = 0,887 \text{ рад.}$$

Площадь зоны отставания (4.35):

$$F_{OTi} = 0,705 \cdot 15,82\pi\varphi\sqrt{0,23 \cdot (1 - 0,3)} \cdot 134,18 = 144,5 \text{ мм}^2.$$

Площадь зоны опережения (4.36):

$$F_{опз} = 359,6 - 144,5 = 215,1 \text{ мм}^2.$$

Осевое усилие при прямом ходе клетки (4.59):

$$Q_{прз} = 2 \times 0,1 \times 817,6(144,5 - 215,1) = - 11545 \text{ Н} = - 11,6 \text{ кН}.$$

Осевое усилие отрицательно, то есть оно – сжимающее.

2. Обратный ход клетки.

Площадь зоны отставания (4.39):

$$F_{OTз} = 15,82\sqrt{0,10 \cdot 134,18} \cdot [\pi - 2(0,887 + 0,4 \cdot 0,6)] = 9,68 \text{ мм}^2.$$

Площадь зоны опережения (4.36):

$$F_{опз} = 253,7 - 9,68 = 244 \text{ мм}^2.$$

Осевое усилие при обратном ходе клетки (4.59):

$$Q_{обрз} = 2 \times 0,1 \times 834,7(9,68 - 244) = - 39117 \text{ Н} = - 39,1 \text{ кН}.$$

Осевое усилие также сжимающее и больше, чем при прямом ходе клетки.

Остальные значения осевых усилий можно рассчитать с помощью программ для ЭВМ [10,12].

На рис. 4.19 приведены графики распределения усилий, рассчитанных для вышеприведенной калибровки для прокатки труб по маршруту $45 \times 5 \rightarrow 25 \times 2,5$ мм из стали 20. Видно, что максимальные значения усилий примерно равны, однако при использовании методики МИСиС наблюдаются большие усилия вблизи калибрующего участка, что отрицательно сказывается на точности труб в связи с упругой деформацией клетки и валков.

Сравнение осевых усилий (рис. 4.20) показало, что меньшие их значения во время обратного хода клетки наблюдаются в данном случае при использовании методики МИСиС.

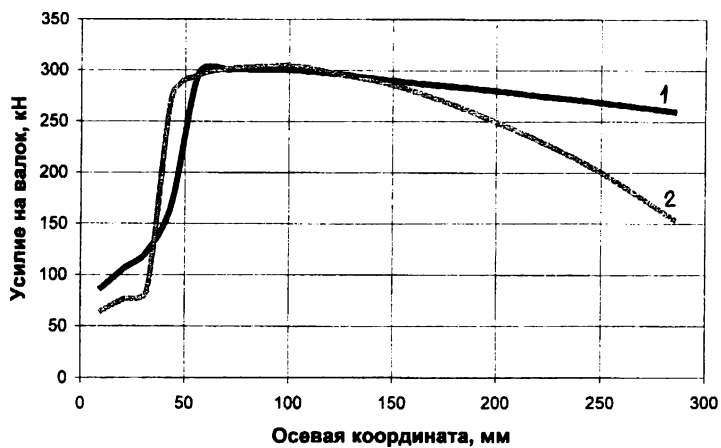


Рис. 4.19. Изменение усилия металла на валки при прямом ходе клетки по длине рабочего конуса для калибровок, рассчитанных по методикам МИСиС (1) и НИТИ-НТЗ (2).

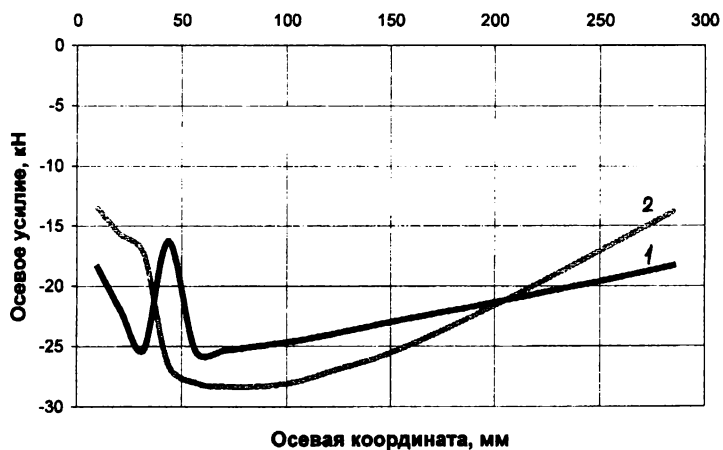


Рис. 4.20. Изменение осевого усилия при обратном ходе клетки по длине рабочего конуса для калибровок, рассчитанных по методикам МИСиС (1) и НИТИ-НТЗ (2).

4.4.3. Расчет момента прокатки

Момент прокатки на одном валке рассчитывается для каждого i -го сечения рабочего конуса как сумма моментов сил, препятствующих вращению валка. Силы, действующие на валок при прямом ходе клетки, показаны на рис. 4.18. Если считать, что плечо вертикальной составляющей силы P равно половине длины МОД, а плечо осевой силы равно радиусу ведущей шестерни $R_{ш}$, момент прокатки при прямом ходе клетки с учетом направления осевого усилия можно определить по формуле:

$$M_{np_i} = P_{np_i} \cdot \frac{\ell_{np_i}}{2} - \frac{Q_{np_i}}{2} R_{ш}. \quad (4.66)$$

Здесь знак перед моментом осевой силы выбран с учетом направления осевого усилия, действующего на валок, в то время как в п. 4.4.2 определяли знак осевого усилия, действующего на заготовку. Таким образом, положительный вклад в момент по формуле (4.66) дает сжимающее осевое усилие на заготовку (отрицательное).

При обратном ходе клетки с учетом направления осевого усилия используют формулу:

$$M_{обр_i} = P_{обр_i} \cdot \frac{\ell_{обр_i}}{2} + \frac{Q_{обр_i}}{2} R_{ш}. \quad (4.67)$$

4.5. Режимы прокатки

Режимы прокатки характеризуются следующими параметрами: коэффициентами вытяжки общим, по стенке и по наружному диаметру, подачей, линейным смещением, углом кантовки, частотой движения клетки, температурой нагрева в случае теплой прокатки.

Рекомендации по выбору коэффициентов вытяжки приведены в п. 2.1.1. При увеличении коэффициента вытяжки μ_{Σ} растет производительность процесса, но, с другой стороны, повышаются усилия прокатки, увеличивается поврежденность металла, снижается качество труб.

Исследования показали, что для получения благоприятной структуры металла необходимо обеспечить постоянство соотношения $\mu_s/\mu_D > 1$ по длине рабочего конуса.

Увеличение подачи m и линейного смещения $m\mu_\Sigma$ влияет аналогично увеличению коэффициента вытяжки. Рекомендуемые величины линейных смещений для различных станов, материалов и типоразмеров труб приводятся в технологических инструкциях цехов (см., например, табл. 4.1). От величины линейного смещения зависит длина калибрующего участка (4.3). Прокатка высокоточных труб проводится на пониженных подачах 5–7 мм.

Угол кантовки выбирается из условий получения минимальной разностенности и предотвращения образования трещин в неблагоприятной зоне выпусков калибра, где схема напряжений близка к одноосному растяжению. Обычно используются углы кантовки $57...60^\circ$. Угол 90° считается нерациональным, так как через один ход клетки объем металла, находящийся в выпусках калибра, опять попадает туда же, что приводит к наведению разностенности и понижению пластичности металла вследствие действия неблагоприятных растягивающих напряжений.

В работах Ю. Б. Чечулина рекомендованы углы кантовки $49...52^\circ$ и $76...79^\circ$, при которых вероятность попадания объема металла, сформированного в выпусках, в круглую часть калибра максимальна за время циклического продвижения вдоль рабочего конуса. Такой режим прокатки благоприятен, так как схема напряженного состояния в круглой части калибра близка к всестороннему сжатию. Рекомендации установлены путем сравнения профилограмм поверхности сечения трубы с учетом последовательного уменьшения утолщений, образованных в выпусках, при попадании в круглую часть калибра и увеличении утолщений в зонах выпусков. Проведенные исследования показали также, что высота утолщений, а значит, и поперечная разностенность, наводимая в процессе

прокатки, зависят от величины подачи, интенсивности обжатий стенки и редуцирования, а также от калибровки инструмента.

Частота движения клетки ν задается числом двойных ходов в минуту, диапазон которого определяется технической характеристикой стана (табл. 2.1). При увеличении ν растет производительность и скорость прокатки, однако повышаются динамические нагрузки на узлы стана. Для уменьшения этих нагрузок при сохранении высокой производительности применяют разнообразные уравнивающие устройства, облегченные клетки (например, из титановых сплавов) и др.

При теплой прокатке назначают температуру подогрева заготовки в индукторе. Первоначально теплая прокатка была предложена в начале 60-х годов [5] для нержавеющей стали типа X18H10T, интенсивность упрочнения которой при нагреве до 200–400°С снижается в 2 раза. Затем получила применение и для других марок сталей (X5M, 30XГСА), титановых сплавов. Температурный режим прокатки выбирается экспериментально с учетом особенностей структуры металла, применяемых смазок, инструмента и т.п. Интервал температур подогрева заготовки в индукторе $\Delta\theta_{\text{под}}$ назначается меньше оптимальной температуры прокатки $\Delta\theta_{\text{пр}}$ на величину разогрева металла при пластической деформации, и его можно оценить по формуле (1.12). Экспериментально установленные режимы нагрева для теплой прокатки приведены в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Температурные режимы теплой прокатки

Марка стали	$\Delta\theta_{\text{пр}}$	$\Delta\theta_{\text{под}}$
X18H10T	200...400	150...200
X5M	200...300	100...200
30XГСА	100...200	60...120

Температура выше 400°С, хотя и уменьшает сопротивление деформации стали X18H10T, но неприемлема для теплой прокатки на обычных станах,

так как осложняются нагрев трубной заготовки и работа механизмов стана, требуются более теплостойкие трубный инструмент и технологическая смазка, затрудняется получение поверхности труб высокого качества. При теплой прокатке происходит нагрев оправок, что снижает их прочность. Исследования показали, что температура оправок из теплостойких сталей 3Х2В8 и 4Х8В2 не должна превышать 480⁰С. Это является одним из главных ограничений табл. 4.9.

Прокатку труб из стали Х5М не рекомендуется вести при температуре выше 300 ⁰С, так как установлено, что в интервале температур 300...400 ⁰С наблюдается снижение пластических свойств, что объясняется скоплением «облаков» Коттрелла, состоящих из атомов углерода и азота, внедряемых в кристаллическую решетку твердого раствора и затрудняющих движение дислокаций. Дальнейший рост температуры способствует отрыву дислокаций и росту пластичности.

Снижение пластических свойств стали 30ХГСА начинается с 200 ⁰С, поэтому и прокатку рекомендуется вести до этих температур (табл. 4.9).

Вообще, подогрев труб выше 350⁰С для последующей теплой прокатки не имеет смысла, поскольку он приводит к перегреву инструмента и потере им стойкости.

4.6. Производительность станов

Производительность станов холодной прокатки определяется количеством метров труб, прокатанных за час. Для одностаночного стана производительность рассчитывается по формуле:

$$P_1 = 60 \cdot 10^{-3} \cdot t_{\mu} \cdot \nu \cdot k_{\text{пер}}, \text{ м/ч}, \quad (4.68)$$

где t_{μ} – линейное смещение, мм; ν – частота движения клетки, 1/мин (см. табл. 2.1); $k_{\text{пер}} = 0,8 \dots 0,9$ – коэффициент перезарядки стана.

Последним коэффициентом учитываются потери времени на перезарядку заготовки и другие потери, зависящие от квалификации

работающих, состояния механизмов стана, качества инструмента и заготовки.

Производительность многониточного стана:

$$\Pi_n = \Pi_1 n_{\text{нит}} \cdot k_{\text{раб}}, \quad (4.69)$$

где $n_{\text{нит}}$ – число ниток; $k_{\text{раб}}$ – коэффициент работоспособности стана.

Коэффициентом $k_{\text{раб}}$ учитывается время текущих простоев. Для станов ХПТ $k_{\text{раб}} = 0,75$, для станов ХПТР он зависит от количества ниток. При $n_{\text{нит}} = 2$ $k_{\text{раб}} = 0,75 \dots 0,78$; для $n_{\text{нит}} = 3$ $k_{\text{раб}} = 0,66 \dots 0,70$; для $n_{\text{нит}} = 4$ $k_{\text{раб}} = 0,60 \dots 0,65$. Причем большие значения выбираются для станов больших типоразмеров.

Для расчета производительности по массе труб результат по формулам (4.68) или (4.69) умножается на массу погонного метра труб \bar{G} , т/м (см. п. 3.5 по расчету расходного коэффициента).

В табл. 4.10 приведены данные о средней производительности станов ХПТ. Расчетная производительность не должна сильно отличаться от данных табл. 4.10.

Таблица 4.10

Средняя производительность станов ХПТ, м/ч

Материал труб	ХПТ 32-3	ХПТ 55-3	ХПТ 90-3
Углеродистые и легированные стали	200...320	190...320	180...300
Высоколегированные стали и сплавы	160...280	160...280	150...260
Сплавы:			
титановые	140...260	140...260	120...240
циркониевые	100...200	100...200	80...170

Производительность станов ХПТР обычно составляет 20–35 м/ч.

4.7. Расчет поврежденности

В настоящее время для оценки возможности разрушения металла рассчитывают его поврежденность. За один проход ХПТ поврежденность может быть рассчитана по приближенной формуле [2]:

$$\omega = 2k_{\text{нем}} \sqrt{\frac{2m(1+2\mu_D\mu_s)}{3(\ell_p - \ell_k)}} \cdot \left[\frac{\ln \mu_D}{\Lambda_{p1}} + \ln \mu_s \left(\frac{1-k_{\text{вып}}}{\Lambda_{p2}} + \frac{k_{\text{вып}}}{\Lambda_{p3}} \right) \right], \quad (4.70)$$

где $k_{\text{нем}} = 1,35 \dots 1,75$ – коэффициент немонотонности деформации;
 $k_{\text{вып}} = 0,3 \dots 0,4$ – коэффициент, учитывающий долю деформации в выпусках калибра; $\Lambda_{pi}(\sigma/T_i; \mu_{\sigma i})$ – пластичность металла в i -й зоне очага деформации.
 Остальные обозначения приняты выше.

Характеристики зон очага деформации:

$i=1$ – зона редуцирования ($\sigma/T_1 = -0,5$; $\mu_{\sigma 1} = 0,2$);

$i=2$ – зона обжатия стенки в вершине калибра ($\sigma/T_2 = -2,7$; $\mu_{\sigma 2} = 0$);

$i=3$ – зона обжатия стенки в выпуске калибра ($\sigma/T_3 = 0,4$; $\mu_{\sigma 3} = -0,9$).

Пластичность рассчитывается по формуле (1.5) с использованием данных табл. 1.3.

Оценку накопленной величины поврежденности можно сделать по критериям (1.7), (1.8).

Пример 10. Расчет поврежденности при прокатке на стане ХПТ-32 труб из стали 20 по маршруту $45 \times 4,1 \rightarrow 25 \times 1,8$ мм с подачей $m = 9$ мм и размерами калибров $\ell_p = 390$ мм; $\ell_k = 100$ мм.

Коэффициенты вытяжки по диаметру и толщине стенки:

$$\mu_D = \frac{D_0 - S_0}{D_n - S_n} = \frac{45 - 4,1}{25 - 1,8} = 1,76; \quad \mu_s = \frac{S_0}{S_n} = \frac{4,1}{1,8} = 2,28.$$

Пластичность металла в зоне редуцирования:

$$\Lambda_{p1} = \exp[0,40 - 0,65 \cdot 0,2 + (-0,78 - 0,12 \cdot 0,2) \cdot (-0,5)] = 1,96.$$

Пластичность металла в вершине калибра при обжатии стенки:

$$\Lambda_{p2} = \exp [0,40 - 0,65 \cdot 0 + (-0,78 - 0,12 \cdot 0) \cdot (-2,7)] = 12,26.$$

Пластичность металла в выпусках калибра при обжатии стенки:

$$\Lambda_{p3} = \exp [0,40 - 0,65 \cdot (-0,9) + (-0,78 - 0,12 \cdot (-0,9) \cdot 0,4)] = 2,05.$$

Рассчитанные значения подставим в формулу (4.70):

$$\omega = 2 \cdot 1,4 \sqrt{\frac{2 \cdot 9 \cdot (1 + 2 \cdot 1,76 \cdot 2,28)}{3(390 - 100)}} \cdot \left[\frac{\ln 1,76}{1,96} + \ln 2,28 \cdot \left(\frac{1 - 0,35}{12,26} + \frac{0,35}{2,05} \right) \right] = 0,572.$$

В данной упрощенной методике не учитываются особенности калибровки инструмента, влияние угла кантовки и ряд других факторов. Более точный расчет поврежденности проводится на ЭВМ по методике, изложенной в [15].

4.8. Технологические ограничения

Рассматривается несколько групп ограничений.

Для обеспечения устойчивого процесса прокатки должны выполняться *геометрические ограничения*, которые обычно учитываются в методиках расчета калибровок инструмента. Запишем их еще раз.

Проверяется зазор для введения оправки $\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - d_u$:

$$\Delta_1^{\min} \leq \Delta_1 \leq \Delta_1^{\max}, \quad (4.71)$$

где $\Delta_1^{\min} = 1,5 \dots 5$ мм – минимально допустимый зазор, который определяется способом правки труб перед прокаткой ($\Delta_1^{\min} = 1,5 \dots 2,5$ мм – при правке на косовальковом стане; $\Delta_1^{\min} = 3 \dots 5$ мм – при правке на роликоправильном стане); $\Delta_1^{\max} \approx 10$ мм – максимально допустимый зазор, который определяется ограничением на длину зоны редуцирования и утолщением стенки в зоне редуцирования.

Для корректировки зазора можно изменить размеры заготовки либо конусность оправки (что потребует пересчета калибровки инструмента).

Во избежание возрастания усилия прокатки в начале участка обжатия, а также образования складок на внутренней поверхности труб ограничивается утолщение стенки в зоне редуцирования (для методики МИСиС) [7]:

$$\Delta S_p \leq 0,4 \dots 0,5 \text{ мм}. \quad (4.72)$$

Для толстостенных передельных и общего назначения труб иногда допускают $\Delta S_p \leq 0,7$ мм.

При невыполнении ограничения (4.72) пересчитывают калибровку инструмента, уменьшая длину зоны редуцирования путем увеличения конусности оправки, или проектируют новый проход прокатки с меньшим обжатием по диаметру.

Для обеспечения устойчивой прокатки ограничивают конусность оправки:

$$2tg\alpha_{\min} \leq 2tg\alpha \leq 2tg\alpha_{\max}, \quad (4.73)$$

где $2tg\alpha_{\min} = 0,002 \dots 0,005$ – минимальная конусность оправки; $2tg\alpha_{\max} = 0,1$ – максимальная конусность.

Ограничение на минимальную конусность связано с ухудшением схода трубы с оправки, возможностью налипания металла на оправку, усложнением настройки стана. Максимальная конусность на одну сторону не должна превышать значение коэффициента трения, который при холодной прокатке составляет $0,05 \dots 0,08$. При нарушении этого ограничения происходит произвольное перемещение рабочего конуса по ходу прокатки, что вызывает повышение усилий прокатки в конце рабочего участка калибров [7].

Прочностные ограничения проверяются на основе расчета силовых параметров.

Наибольшее усилие прокатки, рассчитанное по формулам (4.54), (4.55) или (4.58), не должно превышать максимально допустимое, указанное в паспорте (технической характеристике) стана из условий прочности основных элементов рабочей клетки и валков:

$$P_{\max} \leq [P], \quad (4.74)$$

где $[P]$ можно принять по табл. 2.1.

При невыполнении условия (4.74) надо уменьшить величину подачи без

большого ущерба для производительности и повторить расчеты.

Для предотвращения стыковки труб, особенно при обратном ходе клетки, и потери устойчивости трубы в виде «гармошки» максимальное осевое усилие, рассчитанное по формулам (4.59)...(4.61), проверяется по выражению:

$$\frac{|Q_i^{\max}|}{F_0} \leq 0,8\sigma_{0,2}, \quad (4.75)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения прокатываемой заготовки; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести металла заготовки, определяется по табл. 1.3.

Для снижения осевого усилия при нарушении условия (4.75) часто достаточно уменьшить величину подачи либо изменить радиус ведущей шестерни.

Ограничения, связанные с обеспечением необходимого качества труб, должны удовлетворять требованиям нормативных документов по точности, физико-механическим свойствам, качеству поверхности и др.

В настоящее время не установлены зависимости показателей физико-механических свойств и качества поверхности (шероховатости) от технологических факторов процесса. К тому же необходимо знать уровень исходных свойств заготовки, что не всегда возможно в производственных условиях.

Известны зависимости, связывающие поперечную и продольную разностенность труб с технологическими факторами, однако они построены для определенного сортамента труб и не универсальны.

Например, можно использовать следующую регрессионную зависимость, связывающую поперечную разностенность с различными технологическими факторами:

$$\delta_{s1} = 22,26 + 0,33m - 0,035\delta_{s0} - 0,33\varphi_k + 0,0087 \varphi_k \delta_{s0}, \quad (4.76)$$

где δ_{s0} – поперечная разностенность исходной заготовки, %; φ_k – угол

кантовки, град.; m – подача, мм.

Ожидаемая поперечная разностенность (на одну сторону) по (4.76) не должна быть более предельных отклонений на толщину стенки:

$$\delta_{s1}/2 \leq [\delta_{\min}]. \quad (4.77)$$

Для получения точного наружного диаметра труб ограничивают значение коэффициента полировки:

$$\frac{l_k}{m\mu_z} = [k_{\Pi}], \quad (4.78)$$

где $[k_{\Pi}] = 1,5 \dots 2$ для труб обычной точности и $[k_{\Pi}] = 2,5 \dots 3$ для труб повышенной точности.

Зависимость (4.78) обычно применяется при расчете длины калибрующего участка в методиках расчета калибровок, но может использоваться для оценки возможности прокатки труб по измененному маршруту на имеющихся калибрах.

Точность труб зависит, в частности, от упругой деформации валков и клетки, то есть от их жесткости. Для обеспечения требуемой точности труб по стенке и наружному диаметру упругая деформация ε_y должна быть меньше допусковых отклонений на размер $[\delta_D]$ или $[\delta_S]$, которые могут быть заданы в мм или в %. Например,

$$\varepsilon_y < [\delta_D]. \quad (4.79)$$

Упругая деформация валков на калибрующем участке может быть определена по экспериментальным данным [7]:

$$\text{для стана ХПТ-32} \quad \varepsilon_y = 0,0008 P;$$

$$\text{ХПТ-55} \quad \varepsilon_y = 0,0005 P;$$

$$\text{ХПТ-75(90)} \quad \varepsilon_y = 0,0003 P,$$

где P , кН – усилие на валок на калибрующем участке, может быть определено как среднее по формуле (4.58).

При невыполнении условия (4.79) необходимо обеспечить уменьшение

усилия прокатки за счет уменьшения подачи или других технологических факторов.

Все прокатанные трубы не должны иметь трещин. Возможность их появления, а также микроразрушения проверяется по величине накопленной поврежденности металла труб, которая рассчитывается по формуле (4.70):

$$\omega < [\omega], \quad (4.80)$$

где $[\omega]$ – критическое (пороговое) значение поврежденности, соответствующее требуемому назначению (качеству) труб, указанное в п. 1.4.2.

Расчетная производительность (4.68) не должна быть меньше рекомендованной в табл. 4.10.

Пример 11. Проверим выполнение технологических ограничений при прокатке труб из стали 20 по маршруту $45 \times 5 \rightarrow 25 \times 2,5$ мм. Калибровка по методу НИТИ-НТЗ была рассчитана ранее (пример 5). Режимы прокатки: подача $m = 10$ мм; угол кантовки $\varphi_k = 60^\circ$; исходная разностенность заготовки $\delta_{s0} = 15\%$; трубы выпускаются по ГОСТ 8734–75, где для данного типоразмера предельные отклонения на толщину стенки $[\delta_{\min}] = 10\%$, на наружный диаметр $[\delta_D] = 0,3$ мм. Частота движения клетки 100 1/мин.

Проверим геометрические ограничения.

Зазор для ввода оправки выбирается изначально $\Delta_1 = 3$ мм и удовлетворяет приведенным ограничениям.

Утолщение стенки в зоне редуцирования по этой методике не определяется, но по расчету на ЭВМ $\Delta S_p = 0,038$ мм и не превышает допустимое.

Конусность оправки $tg\alpha = 0,0195$, что соответствует неравенству (4.73).

Силовые ограничения проверим по результатам расчетов усилий на ЭВМ или по формулам (4.54), (4.55): максимальное усилие прокатки

$P_{\max} = 303,89 \text{ кН}$, максимальное осевое усилие $|Q_i^{\max}| = 28,34 \text{ кН}$. Усилие прокатки меньше $[P] = 800 \text{ кН}$ для станов ХПТ-32.

Для проверки осевого усилия рассчитаем площадь поперечного сечения исходной заготовки: $F_0 = \pi \cdot 5(45-5) = 628 \text{ мм}^2$, тогда осевое напряжение

$$\frac{|Q_i^{\max}|}{F_0} = \frac{28340 \text{ Н}}{628 \text{ мм}^2} = 45,1 \text{ МПа}, \text{ что меньше предельного напряжения, которое}$$

для стали 20 (табл. 1.3): $0,8 \cdot 280 = 224 \text{ МПа}$.

Сделаем проверку ограничений по качеству труб. Проверим точность толщины стенки. Для этого вычислим конечную разностенность по (4.76), используя исходные данные:

$$\delta_{s1} = 22,26 + 0,33 \cdot 10 - 0,035 \cdot 15 - 0,33 \cdot 60 + 0,0087 \cdot 60 \cdot 15 = 13,07\%.$$

Таким образом, требования ГОСТ удовлетворяются: $13,07/2 < 10 \%$.

Коэффициент полировки $k_n = 2,5$, что обеспечивает прокатку труб повышенной точности.

Проверим точность наружного диаметра труб с учетом упругой деформации валков по (4.79). Усилие прокатки на калибрующем участке возьмем равным усилию в последнем сечении обжимного участка: $P = 13,82 \text{ кН}$, тогда величина упругой деформации для стана ХПТ-32 $\epsilon_y = 0,0008 \times 13,82 = 0,01 \text{ мм}$, что меньше допускаемых отклонений на наружный диаметр по ГОСТ 8734: $[\delta_D] = 0,3 \text{ мм}$.

Возможность разрушения металла проверяется по величине накопленной поврежденности в данном проходе $\omega = 0,047$, которая полностью залечивается при последующей термической обработке.

Расчетная производительность не должна быть меньше рекомендуемой в табл. 4.10 (для стана ХПТ-32 $\Pi_1 = 200\text{--}320 \text{ м/ч}$). Расчетная производительность по (4.68):

$$\Pi_1 = 60 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 3,56 \cdot 100 \cdot 0,85 = 182 \text{ м/ч}.$$

Таким образом, расчетная производительность меньше рекомендуемой, поэтому увеличим частоту движения клетки до 120 1/мин. Тогда расчетная производительность будет 218 м/ч.

В заключение результаты проверки сводятся в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Результаты проверки технологических ограничений

Параметр	Расчетное значение	Рекомендуемое критическое значение (диапазон)
Зазор для введения оправки, Δ_1 , мм	3	1,5...5
Конусность оправки, $tg\alpha$	0,0195	0,001...0,05
Утолщение стенки в зоне редуцирования, ΔS_p , мм	0,038	0,5
Усилие на валок, P , кН	303,89	800
Осевое напряжение в заготовке, $\frac{Q_i^{\max}}{F_0}$, МПа	45,1	224
Точность толщины стенки, %	6,5	10
Точность наружного диаметра, мм	0,01	0,3
Коэффициент полировки, k_n	2,5	1,5...3
Поврежденность, ω	0,047	0,2...0,3
Производительность, м/ч	218	200...320

5. Прокатка на станах ХПТР

Необходимость разработки станов ХПТР была связана с развитием в 50-х годах XX в. новых областей техники: атомной энергетики, авиации, ракетостроения, химической промышленности, где возникла потребность в особо точных прецизионных, тонкостенных и профильных трубах высокого качества. На существовавшем в то время оборудовании изготовить требуемые трубы не было возможности, поэтому во ВНИИметмаше был разработан роликовый способ холодной прокатки (авторы В. В. Носаль и В. А. Вердеревский), а в конце 50-х годов были созданы первые станы ХПТР, в дальнейшем получившие распространение во всем мире.

При рассмотрении роликовой прокатки применяют те же понятия и определения, что и для прокатки на станах ХПТ (см. п. 4.1), так как процесс ХПТР также относится к периодическим.

5.1. Особенности конструкции станов

На предприятиях используют станы ХПТР малых (ХПТР 4-15, ХПТР 6(8)-15), средних (ХПТР 15-30, ХПТР 30-60) и крупных (ХПТР 60-120, ХПТР 250) типоразмеров. Техническая характеристика станов приведена в табл. 2.1. На малых и средних станах используется трехроликовая схема прокатки, на крупных – четырехроликовая.

Схема стана представлена на рис. 5.1. Отличительная особенность стана – наличие двуплечего рычага НКО, большее плечо которого НО соединено с клетью, а меньшее КО – с сепаратором. Клеть приводится в движение от кривошипно-шатунного механизма, а двуплечий рычаг обеспечивает определенное соотношение скоростей клетки и сепаратора с роликами.

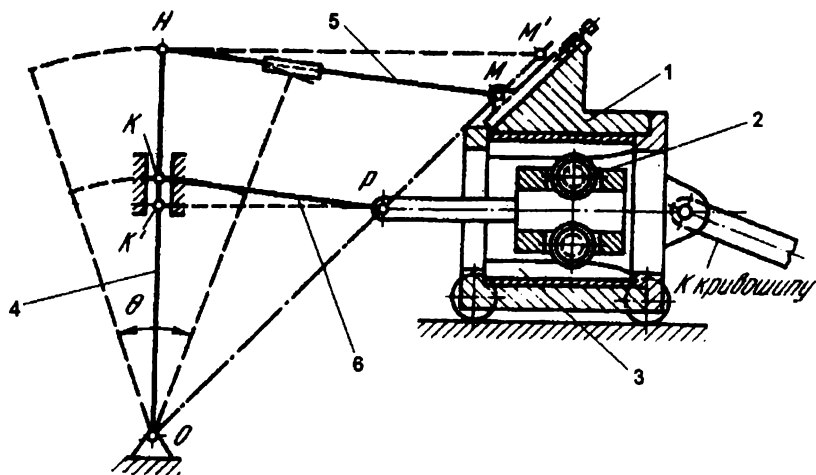


Рис. 5.1. Схема привода клетки среднего стана ХПТР:
 1 – клеть; 2 – сепаратор с роликами; 3 – опорные планки;
 4 – двуплечий рычаг; 5 – штанга крепления рычага с клетью;
 6 – планки крепления рычага с сепаратором.

Поперечный разрез клетки для трехроликовой схемы приведен на рис. 5.2. Клеть представляет собой толстостенную втулку-станину, внутри которой установлены опорные планки и ролики, заключенные в сепаратор. Сепаратор в виде втулки имеет три прямоугольных окна для размещения роликов и две проушины для соединения с рычажной системой. Последняя обеспечивает определенное соотношение скоростей клетки и сепаратора для исключения проскальзывания роликов. Точная установка опорных планок достигается с помощью сегментов и клиньев, которые крепятся к станине с помощью болтов и пружин. Ролики устанавливаются на подшипниках скольжения в пазах сепаратора, который удерживает их в одной вертикальной плоскости. Рабочая клеть движется возвратно-поступательно от кривошипно-шатунного механизма. Движение осуществляется в направляющих неподвижной рамы на прокладках из фторопласта.

Деформирующим инструментом роликовой прокатки являются ролики и длинная цилиндрическая оправка (рис. 5.3). Ролики имеют ручей

постоянного радиуса R_m , соответствующего радиусу готовой трубы, реборды диаметром D_p и цапфы диаметром $D_{ц}$. Обжатие осуществляется благодаря опорным планкам переменной высоты швеллерообразной формы, на которые опираются ролики через цапфы.

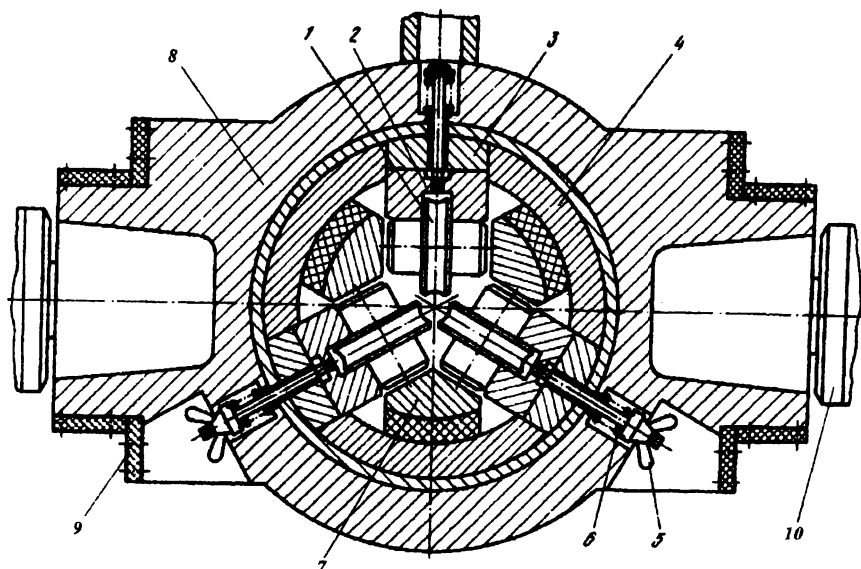


Рис. 5.2. Поперечный разрез клетки стана ХПТР:

1 – ролики; 2 – опорные планки; 3 – регулировочные клинья;
4 – промежуточные сегменты; 5 – болты; 6 – пружины; 7 – сепаратор;
8 – толстостенная втулка (станина); 9 – опоры скольжения (прокладки из фторопласта); 10 – оси привода кривошипно-шатунного механизма.

Иногда для прокатки осеботонкостенных труб ($D/S > 100$) используют более 4 роликов без цапф, которые опираются на направляющие планки поверхностью ручья. Ролик характеризуют также идеальным диаметром D_i , диаметром по вершине калибра D_v и катающим диаметром D_k – некоторым средним диаметром калибра, определяющим скорость течения металла. Оправка цилиндрической формы имеет диаметр $D_{оп}$,

1 – опорная планка; 2 – ролик; 3 – оправка

Устойчивая роликовая прокатка возможна только при определенном соотношении скоростей клетки и роликов (сепаратора). Конструкция стана такова, что клеть и опорные планки движутся с одной скоростью, так как они жестко закреплены, а скорость роликов равна скорости сепаратора. Для регулирования скоростного режима стан имеет рычажную систему (см. рис. 5.1). Рассмотрим произвольный момент прокатки и построим эпюру поступательных скоростей ролика (рис. 5.4).

$v_{рол} = v_{сеп}$. Из подобия соответствующих треугольников получаем:

$$\frac{v_{cen}}{v_{кл}} = \frac{R_k}{R_k + R_{ц}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{ц}}{R_k}}, \quad (5.1)$$

где $R_k = D_k/2$ – катающий радиус; $R_{ц} = D_{ц}/2$ – радиус цапфы ролика.

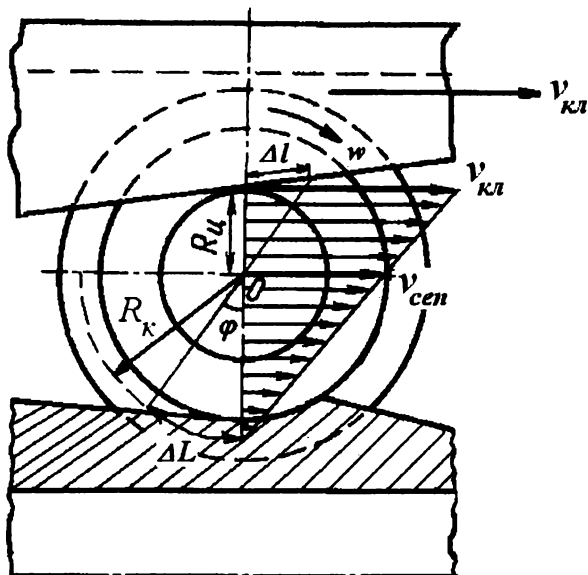


Рис. 5.4. Эпюра поступательных скоростей ролика

Рассмотрим далее соотношение ходов ролика по опорной планке Δl и по трубе ΔL (см. рис. 5.4) при повороте ролика на угол φ . Ход ролика по опорной планке равен длине дуги цапфы ролика с центральным углом φ :

$$\Delta l = \varphi \cdot R_{ц}, \quad (5.2)$$

аналогично

$$\Delta L = \varphi \cdot R_k. \quad (5.3)$$

Таким образом, соотношение длин

$$\frac{\Delta l}{\Delta L} = \frac{R_{ц}}{R_k}. \quad (5.4)$$

Формула (5.4) показывает также соотношение длин соответствующих отрезков на опорной планке и рабочем конусе, что используется в дальнейшем при расчете калибровки опорной планки и анализе условий прокатки на рабочем конусе.

В предельном случае формула (5.4) определяет отношение рабочей длины опорной планки и рабочего конуса:

$$\frac{\ell_p}{L_p} = \frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{к}}}.$$

Ход клетки стана ХПТР $\Delta L_{\text{кл}}$ складывается из хода роликов по опорной планке $\Delta \ell$ и по трубе ΔL . Используя формулы (5.2), (5.3), получим:

$$\Delta L_{\text{кл}} = \Delta \ell + \Delta L = \varphi(R_{\text{ц}} + R_{\text{к}}). \quad (5.5)$$

Применяя формулы (5.2) и (5.5), рассчитаем соотношение хода ролика по планке и хода клетки:

$$\frac{\Delta \ell}{\Delta L_{\text{кл}}} = \frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{ц}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{к}}}{R_{\text{ц}}}}, \quad (5.6)$$

которое используется далее при расчете длин участков опорной планки.

В предельном случае формула (5.5) позволяет рассчитать полную длину хода клетки:

$$L_{\text{кл}} = \ell_p + L_p. \quad (5.7)$$

5.3. Расчет калибровки инструмента

Исходные данные для расчета: проход прокатки $D_0 \times S_0 \rightarrow D_T \times S_T$ ($D_0 \times S_0$ – исходные размеры; $D_T \times S_T$ – конечные размеры, мм); типоразмер стана выбирается в зависимости от D_T ; технические характеристики стана – см. табл. 2.1: количество роликов в клетке n_p ; длина хода клетки $L_{\text{кл}}$, в том числе за период подачи-поворота $L_{\text{п}}$; идеальный

диаметр ролика $D_i = 2R_0$; подача m . Расчет калибровки рассмотрим на примере.

Пример 12. Расчет калибровки инструмента стана ХПТР для прохода прокатки $12 \times 1 \rightarrow 10 \times 0,5$ мм. Типоразмер стана – ХПТР 6-15; количество роликов в клетке $n_p = 3$; длина хода клетки $L_{кл} = 490$ мм, в том числе за период подачи-поворота $L_n = 75$ мм; идеальный диаметр ролика $D_i = 36$ мм; подача $m = 5$ мм.

Калибровка ролика.

Диаметр ролика по вершине калибра:

$$D_s = D_i - D_T = 36 - 10 = 26 \text{ мм}.$$

Диаметр ролика по ребордам:

$$D_p = D_s + D_T \left(1 - \cos \frac{180^\circ}{n_p}\right) = 26 + 10 \cdot (1 - \cos 60^\circ) = 31 \text{ мм}.$$

Ширина реборды:

$$B_p = 0,7 \frac{D_T}{2} \left(1 - \cos \frac{180^\circ}{n_p}\right) = 0,7 \cdot \frac{10}{2} (1 - \cos 60^\circ) = 1,75 \text{ мм}.$$

Диаметр цапф выбирается по допустимой нагрузке на один ролик:

$$\text{при } n_p = 3 \quad D_{ц} = 0,75 D_s = 0,75 \cdot 26 = 19,5 \text{ мм};$$

$$\text{при } n_p = 4 \quad D_{ц} = 0,62 D_s.$$

Катающий диаметр ролика:

$$\text{при } n_p = 3 \quad D_k = D_s + 0,2 D_T = 26 + 0,2 \cdot 10 = 28 \text{ мм};$$

$$\text{при } n_p = 4 \quad D_k = D_s + 0,1 D_T.$$

Примечание. Калибр ролика обычно имеет развалку (рис. 5.5), которая характеризуется углом γ . Цель развалки: обеспечить редуцирование трубы по диаметру в начале рабочего участка и уменьшить врезание реборд в тело трубы на обжимном участке. Развал может выполняться по касательной к окружности ручья, как показано на рис. 5.5, или радиусом, большим, чем радиус калибра. Угол развала γ зависит от обжатия трубы по диаметру и стенке, а также от числа роликов; обычно выбирается $\gamma = 15-25^\circ$.

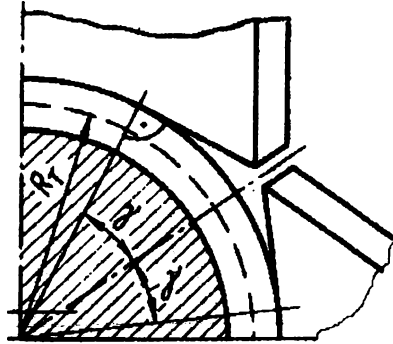


Рис. 5.5. Схема развалки ролика

Калибровка опорной планки.

Рабочая длина планки рассчитывается в соответствии с формулой (5.6):

$$\ell_p = \frac{L_{кл}}{1 + \frac{D_k}{D_{ц}}} = \frac{490}{1 + \frac{28}{19,5}} = 201,2 \text{ мм.}$$

Аналогично рассчитывается длина участка подачи-поворота:

$$\ell_n = \frac{L_n}{1 + \frac{D_k}{D_{ц}}} = \frac{75}{1 + \frac{28}{19,5}} = 30,8 \text{ мм.}$$

Длина участка редуцирования принимается:

$$l_{ред} = 10 \dots 12 \text{ мм} = 10 \text{ мм.}$$

Длина калибрующего участка рассчитывается с использованием формулы (5.4):

$$\ell_k = k_n m \mu_{\Sigma} \frac{D_{ц}}{D_k} = 4 \cdot 5 \cdot 2,32 \cdot \frac{19,5}{28} = 32,3 \text{ мм,}$$

где $k_n = 4 \dots 5$ – коэффициент полировки;

$$\mu_{\Sigma} = \frac{S_0(D_0 - S_0)}{S_T(D_T - S_T)} = \frac{1 \cdot (12 - 1)}{0,5 \cdot (10 - 0,5)} = 2,32 \text{ мм} - \text{ суммарный}$$

коэффициент вытяжки.

Длина обжимного участка:

$$l_{обж} = l_p - l_n - l_{ред} - l_k = 201,2 - 30,8 - 10 - 32,3 = 128,1 \text{ мм.}$$

Зазор между трубой и оправкой:

$$\Delta l = D_0 - 2S_0 - D_{он} = 12 - 2 - 9 = 1 \text{ мм,}$$

что находится в требуемом диапазоне $[0,5...2]$ мм,

где $D_{он} = D_T - 2S_T = 10 - 1 = 9$ мм – диаметр цилиндрической оправки.

Утолщение стенки в зоне редуцирования:

$$\Delta S_p = (0,05...0,06) \Delta l = 0,05 \cdot 1 = 0,05 \text{ мм.}$$

Для расчета профиля обжимного участка используется методика МИСиС (п. 4.3.3.2), участок делится на 7 частей. Длина контрольного участка: $\Delta l = l_{обж}/7 = 128,1/7 = 18,3$ мм.

Толщина стенки в конце зоны редуцирования в сечении $i=1$:

$$S_1 = S_0 + \Delta S_p = 1 + 0,05 = 1,05 \text{ мм.}$$

Расчет толщины стенки в контрольных сечениях:

$$S_i = S_1 \left[\frac{\frac{S_1}{S_T} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{i-1}{7}}) + 1 \right]^{-1}.$$

Например,

$$S_2 = S_1 \left[\frac{\frac{S_1}{S_T} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{2-1}{7}}) + 1 \right]^{-1} = 1,05 \left[\frac{\frac{1,05}{0,5} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{2-1}{7}}) + 1 \right]^{-1} = 0,872 \text{ мм}$$

$$S_3 = S_1 \left[\frac{\frac{S_1}{S_T} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{3-1}{7}}) + 1 \right]^{-1} = 1,05 \left[\frac{\frac{1,05}{0,5} - 1}{1 - e^{-0,64}} (1 - e^{-0,64 \frac{3-1}{7}}) + 1 \right]^{-1} = 0,756 \text{ мм}$$

и т. д. Результаты приведены в табл. 5.1.

Изменение высоты опорной планки в i -м сечении:

$$Y_i = S_i - S_T.$$

В рассматриваемом случае

$$Y_1 = S_1 - S_T = 1,05 - 0,5 = 0,55 \text{ мм};$$

$$Y_2 = S_2 - S_T = 0,872 - 0,5 = 0,372 \text{ мм};$$

$$Y_3 = S_3 - S_T = 0,756 - 0,5 = 0,256 \text{ мм}$$

и т. д.

Назначается обратная конусность K калибрующего участка для компенсации упругой деформации роликов (рис. 5.6):

Тип стана	ХПТР 6(8)-15	ХПТР 15-30	ХПТР 30-60	ХПТР 60-120
K , мм	0,15...0,20	0,20...0,25	0,25...0,35	0,35...0,45

Назначим $K = 0,2$ мм.

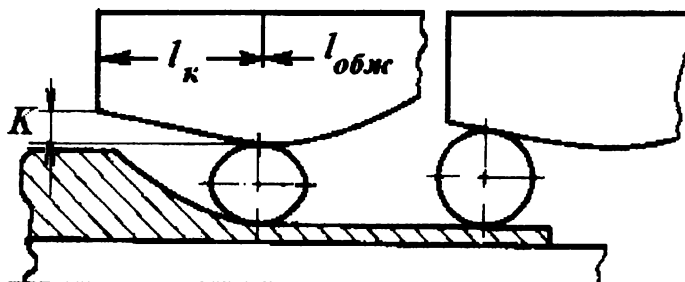


Рис. 5.6. Схема компенсации упругой деформации ролика

Таблица 5.1

Калибровка обжимного участка опорной планки, мм

Параметры калибровки	Номер сечения							
	1	2	3	4	5	6	7	8
X_i	0	18,3	36,6	54,9	73,2	91,5	109,8	128,1
S_i	1,05	0,872	0,756	0,675	0,614	0,568	0,530	0,5
Y_i	0,55	0,372	0,256	0,175	0,114	0,068	0,030	0

Калибровка оправки.

Оправка характеризуется диаметром $D_{\text{оп}}$ (определен в п. 2.6 расчета калибровки) и длиной $L_{\text{оп}}$. Длина оправки принимается несколько больше длины рабочего конуса с учетом формулы (5.7):

$$\begin{aligned} L_{\text{оп}} &= L_p + (50 \dots 80) \text{ мм} = L_{\text{кл}} - \ell_p + (50 \dots 80) \text{ мм} = \\ &= 490 - 201,2 - 60 \approx 230 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Увеличение длины связано с возможностью осевого перемещения оправки для предупреждения локального износа.

Оправка должна быть строго цилиндрической или иметь небольшую прямую конусность (разница в диаметрах порядка 0,01-0,015 мм), чтобы гарантировать отсутствие обратной конусности, что может вызвать налипание металла и увеличение усилия подачи.

5.4. Расчет силовых параметров

Так же, как и при прокатке на станах ХПТ, для определения усилий прокатки необходимо рассчитать распределение обжатий между прямым и обратным ходом клетки. Но если большинство станов ХПТ обладает достаточной жесткостью, и распределение обжатий можно определить по формулам (4.8), (4.9), то при прокатке на станах ХПТР более тонкостенных труб распределение обжатий по длине хода клетки непостоянно и носит более сложный характер. Истинное (остаточное) обжатие при обратном ходе клетки зависит от упругой деформации роликов и клетки при прямом ходе, которую можно определить, зная упругую линию стана $P = f(\Delta_{\text{упр}})$, где P – усилие прокатки; $\Delta_{\text{упр}}$ – упругая деформация роликов и клетки.

Необходимые для определения усилия прокатки величины суммарных абсолютных обжатий могут быть вычислены по уточненной формуле (4.10) при нулевой конусности оправки:

$$\Delta S_{\Sigma i} = m \mu_i \text{tg} \beta_i + k e^{-\sigma_{si} / \sigma_{s0}}, \quad (5.8)$$

где k – коэффициент, зависящий от материала трубы ($k=0,1$ для нержавеющей стали; $k=0,02\dots 0,03$ – для углеродистых сталей); σ_{s0} и σ_{si} – сопротивление деформации металла соответственно в начале рабочего конуса и в рассматриваемом i -м сечении;

$$\operatorname{tg} \beta_i = \frac{\Delta D_i}{2 \cdot \Delta L}, \quad (5.9)$$

где $\operatorname{tg} \beta_i$ – конусность образующей рабочего конуса; $\Delta D_i = D_{i-1} - D_i$ – изменение диаметра на участке ΔL ; например, $D_i = D_{on} + 2S_i$; толщина стенки S_i рассчитывается по калибровке инструмента (п. 2.10);

$\Delta L = \Delta l \frac{R_k}{R_y}$ – длина контрольного участка на рабочем конусе, рассчитывается по формуле (5.4); Δl – длина контрольного участка опорной планки (см. с. 147 – калибровка инструмента); остальные обозначения расшифрованы ранее.

Площадь контактной поверхности определяется аналогично площади станов ХПТ, формулы для ее вычисления приведены в [15]. Среднее давление может быть подсчитано по известным зависимостям из теории листовой прокатки. По данным [13], лучшую сходимость с экспериментальными данными показала формула А. И. Целикова.

5.4.1. Усилие металла на ролик

Методика определения усилия металла на ролик стана ХПТР сохраняется обычной, однако аналитически вычислить величины абсолютных обжатий при прямом и обратном ходе клетки с учетом упругого сжатия роликов в данном случае можно только итеративным методом, что занимает много времени. В целях упрощения решения задачи в книге [13] предлагается номограмма (рис. 5.7), с помощью которой

довольно просто определить усилия при прямом и обратном ходе клетки в данном сечении рабочего конуса $P_{\text{пр}}^H, P_{\text{обр}}^H$.

По оси абсцисс номограммы отложена толщина стенок трубы S по длине рабочего конуса. Тогда разность толщины стенок ΔS будет определять величину относительного обжатия за цикл прокатки, которая рассчитывается по формуле (5.8). Номограмма содержит сетку линий, отражающих зависимость усилия прокатки от обжатия толщины стенки $P(\Delta S)$, построенных с учетом упругого сжатия роликов и упрочнения металла по методике А. И. Целикова для листовой прокатки. Для определения искомых величин находятся точки пересечения линий с упругой линией стана $P = f(\Delta_{\text{упр}})$, характеризующей жесткость клетки.

Для определения усилий в другом случае прокатки (например, другой стали) используют соотношения:

$$P_2 = P_1(\sigma_{s2} / \sigma_{s1})^2; \quad (5.10)$$

$$P_2 = P_1(B_2 / B_1), \quad (5.11)$$

где P_1, P_2 – усилия прокатки по двум вариантам соответственно; σ_{s1}, σ_{s2} – сопротивление деформации разных сплавов; B_1, B_2 – ширина контактной поверхности в двух вариантах.

Соотношения (5.10) и (5.11) показывают, что при прочих равных условиях усилие прокатки возрастает пропорционально сопротивлению деформации и ширине контактной поверхности.

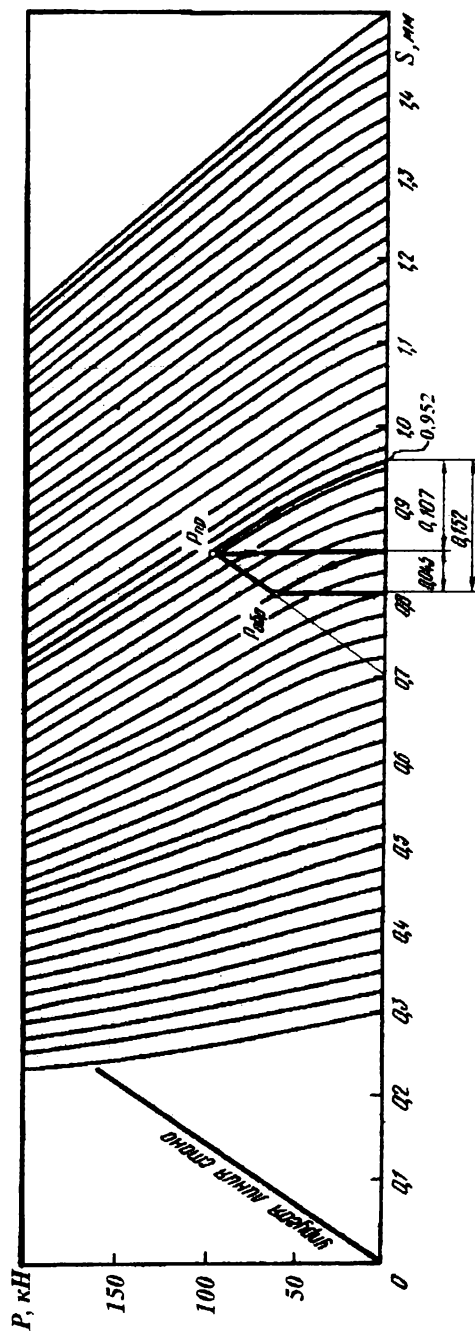


Рис. 5.7. Номограмма для определения усилий прокатки для стана ХПТР 30-60 [13]

Рассмотрим использование номограммы на примере.

Пример 13. Определим усилие прокатки при прямом и обратном ходе клетки для прохода прокатки $37 \times 1,0 \rightarrow 35,5 \times 0,4$ мм с подачей $m=6,5$ мм в сечении, где толщина стенки трубы $S_i = 0,8$ мм. Материал трубы – сталь типа 1X18H10T, суммарное абсолютное обжатие, рассчитанное по формуле (5.8), $\Delta S_i = 0,152$ мм. Тогда исходная толщина стенки $S_{i-1} = 0,8 + 0,152 = 0,952$ мм. Далее воспользуемся номограммой на рис. 5.7. Находим линию $P(S)$, выходящую из точки, соответствующей исходной стенке 0,952 мм, и поднимаемся по ней вверх по стрелке до пересечения с прямой, параллельной упругой линии стана. Прямая проводится таким образом, чтобы координата S ее пересечения с одной из линий $P(S)$ была $S_i = 0,8$ мм. Точка пересечения с правой линией $P(S)$ покажет усилие при прямом ходе клетки $P_{пр} = 98$ кН, а с левой линией – усилие при обратном ходе $P_{обр} = 62$ кН. Пересечение левой линии $P(S)$ с осью абсцисс покажет относительные обжатия при прямом и обратном ходе клетки, соответственно 0,107 и 0,045 мм. Пересечение упругой линии стана с осью абсцисс покажет предварительную установку роликов (зазор между образующей оправки и ручьем ролика – 0,7 мм) для прокатки заданной толщины стенки, в данном сечении $S_i = 0,8$ мм.

На рис. 5.8 приведены опытные данные по изменению усилия прокатки при прямом и обратном ходе клетки с различными подачами. Из рисунка видно, что с увеличением подачи усилие значительно возрастает, это связано с увеличением истинных обжатий в МОД. Распределение усилий в пределах хода клетки носит тот же характер, что и на стане ХПТ. Отличие состоит в том, что величины усилий при прямом и обратном ходе клетки различаются не столь сильно, как на станах ХПТ (при обратном ходе усилие на 10–15% меньше, чем при прямом). Это объясняется распределением истинных обжатий при прямом и обратном ходе (за обратный ход может деформироваться до 40–45% объема подачи). На величину нормальных усилий, действующих на ролики станов ХПТР, оказывают влияние в основном те же факторы, что и на стане ХПТ.

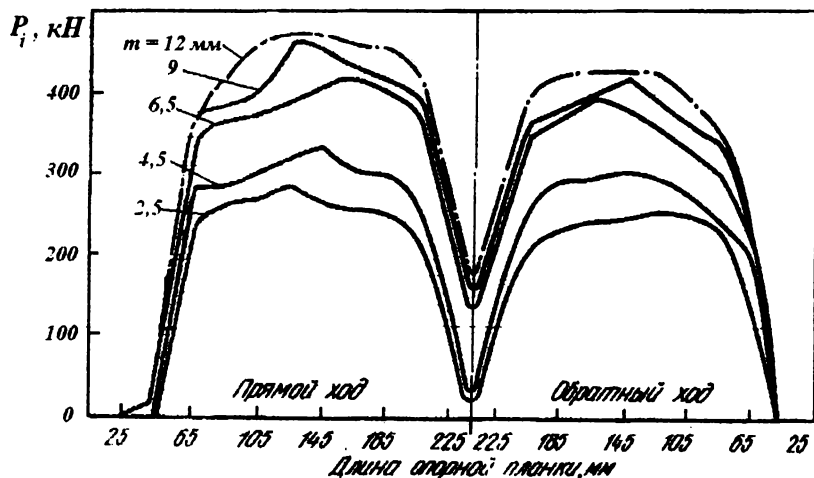


Рис. 5.8. Изменение усилия прокатки по длине опорной планки при прямом и обратном ходе клетки в зависимости от величины подачи при прокатке по маршруту $51 \times 1,5 \rightarrow 47 \times 0,6$ мм, материал – сталь типа 1X18H10T [13]

Для определения среднего за цикл прокатки усилия можно пользоваться формулой Ю. Ф. Шевакина [2]:

$$\bar{P}_{\text{ХРТР}} = k_{\sigma} \bar{\sigma}_{\epsilon} (D_0 + D_T) \sqrt{m \mu_{\Sigma} (S_0 - S_T) R_k / (\ell_{\text{обж}} - \ell_{\text{ред}})}, \quad (5.12)$$

где $k_{\sigma} = 1,6 \dots 2,2$ – коэффициент, учитывающий особенности роликовой прокатки; $\bar{\sigma}_{\epsilon} = \frac{1}{2}(\sigma_{\epsilon 0} + \sigma_{\epsilon T})$ – среднее временное сопротивление металла (табл. 1.3); остальные размеры обозначены при расчете калибровки инструмента стана ХПТР.

Пример 14. Рассчитаем по формуле (5.12) усилие прокатки для прохода $51 \times 1,5 \rightarrow 47 \times 0,6$ мм с подачей 4,5 мм, материал – сталь 08X18H10T.

Из расчета калибровки инструмента имеем: длины зон планки: $\ell_{\text{обж}} = 148,8$ м; $\ell_{\text{ред}} = 10$ мм; катающий радиус $R_k = 22,8$ мм; $\mu_{\Sigma} = 2,67$.

Определим временное сопротивление стали по табл. 1.1: для заготовки

$\sigma_{\epsilon 0} = 667$ МПа; для готовой трубы с учетом относительного обжатия

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{1}{\mu_{\Sigma}}\right)100\% = \left(1 - \frac{1}{2,67}\right)100\% = 62,5\%,$$

$$\sigma_{\varepsilon T} = \sigma_{\varepsilon 0} + q\varepsilon^b = 667 + 19 \cdot (62,5)^{0,84} = 1279,8 \text{ МПа};$$

$$\text{среднее } \bar{\sigma}_{\varepsilon} = \frac{1}{2}(667 + 1279,8) = 973,4 \text{ МПа.}$$

Подставим найденные значения в формулу (5.11):

$$\bar{P}_{\text{ХПТР}} = 1,8 \cdot 973,4 \cdot (51 + 47) \cdot \sqrt{4,5 \cdot 2,67 \cdot (1,5 - 0,6) \cdot 22,8 / (148,8 + 10)} = 214,6 \text{ кН.}$$

Полученное значение согласуется с соответствующим графиком на рис. 5.8.

5.4.2. Осевые усилия в заготовке при обратном ходе клетки

Ранее было показано, что деформация при прокатке на станах ХПТР происходит как при прямом, так и при обратном ходе клетки. Во время обратного хода обжимается часть поданного объема металла, которая не могла быть раскатана при прямом ходе вследствие упругой деформации клетки и роликов. Следовательно, величина обжатия во время обратного хода определяется разностью упругих деформаций, возникающих при прямом и обратном ходе клетки. На практике при обратном ходе клетки может деформироваться до 40–45% всего поданного объема металла. Поскольку на роликовых станах прокатка производится на цилиндрической оправке, условия прямого и обратного хода одинаковы с точки зрения течения металла. При движении клетки вперед вытяжка происходит в направлении выхода готовой трубы, при обратном ходе металл стремится течь в сторону заготовки. Однако этому течению препятствует жесткий патрон подачи, и металл вынужден течь также в сторону готовой трубы, как бы пропрессовываясь через кольцевую щель, образованную профилем калибров и оправкой. В этот период в заготовке возникают наибольшие усилия [13].

Теоретически предельную величину осевых усилий при обратном ходе клетки можно определить с помощью зависимостей, используемых при прессовании труб. Например, для расчета осевого усилия в i -м сечении рабочего конуса в [13] рекомендуется эмпирическая зависимость Л. В. Прозорова (знак «-» показывает, что усилие сжимающее):

$$Q_{\text{обри}} = -5\sigma_{\text{в}} F_i \ln \frac{F_i}{F_{i+1}}, \quad (5.13)$$

где 5 – коэффициент, учитывающий силы трения и неравномерность распределения напряжений в трубной заготовке; $\sigma_{\text{в}}$ – временное сопротивление металла трубы в данном сечении с учетом упрочнения (табл. 1.3); F_i , F_{i+1} – площади поперечных сечений (данного i -го и следующего за ним $(i+1)$ -го).

Площадь $(i+1)$ -го сечения отличается от данного на величину истинного обжатия поперечного сечения при обратном ходе клетки:

$$F_{i+1} = F_i - \Delta F_{\text{обри}}$$

где

$$\Delta F_{\text{обри}} = \pi k_t \cdot \Delta S_{\text{обри}} (D_i + \Delta S_{\text{обри}}),$$

где $k_t = 0,60 \dots 0,97$ – коэффициент, учитывающий отношение обжатой части трубы ко всему ее периметру; D_i – диаметр трубы в данном сечении.

Истинное относительное обжатие при обратном ходе клетки приближенно может быть принято таким:

$$\Delta S_{\text{обри}} = (0,40 \dots 0,45) \Delta S_{\Sigma i}, \quad (5.14)$$

где $\Delta S_{\Sigma i}$ – суммарное истинное обжатие, рассчитывается по формуле (5.8).

Более точное распределение обжатия на прямой и обратный ход клетки может быть сделано с использованием номограммы рис. 5.7 или аналогичных ей, приведенных в книге [13].

Рассчитанное осевое усилие проверяется по формуле (4.62), как и при прокатке на стане ХПТ.

Пример 15. Рассчитаем осевое усилие при обратном ходе клетки по формуле (5.13), возникающее при прокатке труб по маршруту $51 \times 1,6 \rightarrow 47 \times 0,6$ мм в сечении рабочего конуса, отстоящем от начала на 160 мм, имеющего размеры $D_i = 47,27$ мм; $S_i = 0,73$ мм. Подача $m = 4,5$ мм, радиус цапфы ролика $R_u = 13,5$ мм, катающий радиус $R_k = 22,7$ мм. Длина контрольного участка при расчете калибровки опорной планки $\Delta l = 21$ мм. Марка стали 08X18H10T.

Площадь i -го поперечного сечения $F_i = \pi \cdot 0,73 \cdot (47,27 - 0,73) = 106,7 \text{ мм}^2$.

Текущий коэффициент вытяжки

$$\mu_i = \frac{S_0(D_0 - S_0)}{S_i(D_i - S_i)} = \frac{1,6(51 - 1,6)}{0,73(47,27 - 0,73)} = 2,32.$$

Текущая конусность развертки рабочего конуса $tg\beta_i$ рассчитывается по формуле (5.9), где $\Delta D_i = 0,16$ мм – перепад диаметров между соседними сечениями в соответствии с калибровкой опорной планки;

$$\Delta L = \Delta l \frac{R_k}{R_u} = 21 \frac{22,7}{13,5} = 35,3 \text{ мм}, \text{ тогда } tg\beta_i = \frac{\Delta D_i}{2 \cdot \Delta L} = \frac{0,16}{2 \cdot 35,3} = 0,002.$$

Для вычисления общего истинного обжатия по формуле (5.8) определим сопротивление деформации. В соответствии с табл. 1.3 для стали 08X18H10T $\sigma_{s0} = 322$ МПа, а σ_{si} определим с учетом упрочнения. Степень деформации сдвига, накопленную к i -му сечению, можно приближенно оценить как

$$\Lambda_i \approx 2 \ln \mu_i = 2 \ln 2,32 = 3,36.$$

$$\text{Тогда } \sigma_{si} = 322 + 813 \cdot 3,36^{0,41} = 1655 \text{ МПа}.$$

Истинное обжатие

$$\Delta S_{\Sigma i} = m \mu_i tg\beta_i + k e^{-\sigma_{si}/\sigma_{s0}} = 4,5 \cdot 2,32 \cdot 0,002 + 0,1 e^{-1655/322} = 0,02 + 0,006 = 0,026 \text{ мм}.$$

Истинное обжатие при обратном ходе клетки по (5.14):

$$\Delta S_{\text{обп}} = (0,40 \dots 0,45) \Delta S_{\Sigma i} = 0,4 \cdot 0,026 = 0,01 \text{ мм}.$$

Обжатие поперечного сечения при обратном ходе клетки:

$$\Delta F_{\text{обр}i} = \pi k_i \cdot \Delta S_{\text{обр}i} (D_i + \Delta S_{\text{обр}i}) = \pi \cdot 0,9 \cdot 0,01 \cdot (47,27 + 0,01) = 1,34 \text{ мм}^2.$$

Для вычисления осевого усилия по формуле (5.13) необходимо определить временное сопротивление стали с учетом упрочнения. Вычислим относительное обжатие поперечного сечения:

$$\varepsilon_i = \frac{F_0 - F_i}{F_0} 100\% = (1 - \frac{1}{\mu_i}) 100\% = (1 - \frac{1}{2,32}) 100\% = 57\%.$$

В соответствии с табл. 1.3, $\sigma_{ei} = 667 + 19 \cdot 57^{0,84} = 1233,2 \text{ МПа}$.

Окончательно получаем:

$$Q_{\text{обр}i} = -5\sigma_{ei} F_i \ln \frac{F_i}{F_{i+1}} = -5 \cdot 1233,2 \cdot 106,7 \cdot \ln \frac{106,7}{106,7 - 1,34} = -8,6 \text{ кН}.$$

Расчеты показали, что формулу (5.13) можно упростить. Во-первых, учитывая малое изменение наружного диаметра, можно принять

$$\frac{F_i}{F_{i+1}} \approx \frac{S_i}{S_{i+1}}, \text{ где } S_{i+1} = S_i - \Delta S_{\text{обр}i}.$$

Далее, используя разложение логарифмической функции в степенной ряд и ограничиваясь первым членом ($\ln x \approx x - 1$), можно записать:

$$\ln \frac{S_i}{S_{i+1}} \approx \frac{S_i}{S_{i+1}} - 1 = \mu_{\text{сообр}i} - 1.$$

Таким образом, формулу (5.13) можно использовать в виде

$$Q_{\text{обр}i} = -5\sigma_{ei} F_i (\mu_{\text{сообр}i} - 1), \quad (5.15)$$

где $\mu_{\text{сообр}i} = \frac{S_i}{S_{i+1}}$ – текущий коэффициент вытяжки по стенке при обратном ходе клетки; $S_{i+1} = S_i - \Delta S_{\text{обр}i}$ – толщина стенки в соседнем сечении.

Рассчитаем усилие по формуле (5.15), используя ранее рассчитанные значения: $\mu_{\text{сообр}i} = \frac{S_i}{S_{i+1}} = \frac{0,73}{0,73 - 0,01} = 1,014$.

$$Q_{\text{обр}i} = -5\sigma_{ei} F_i (\mu_{\text{сообр}i} - 1) = -5 \cdot 1233,2 \cdot 106,7 \cdot (1,014 - 1) = -9,2 \text{ кН}.$$

Проверим величину найденного осевого усилия по формуле (4.62):

$$\frac{|Q_i|}{\pi S_0(D_0 - S_0)} = \frac{9200 H}{\pi \cdot 1,6(51 - 1,6)} = 37 \text{ МПа} \leq 0,8\sigma_{0,2} = 0,8 \cdot 813 = 650 \text{ МПа},$$

где $\sigma_{0,2}$ – предел текучести металла заготовки, определен по табл. 1.3 для стали 08Х18Н10Т.

Проверка показывает, что рассчитанное осевое усилие не вызовет стыковку торцов заготовок.

На рис. 5.9 приведены экспериментальные данные зависимости осевых усилий от режимов роликовой прокатки [13].

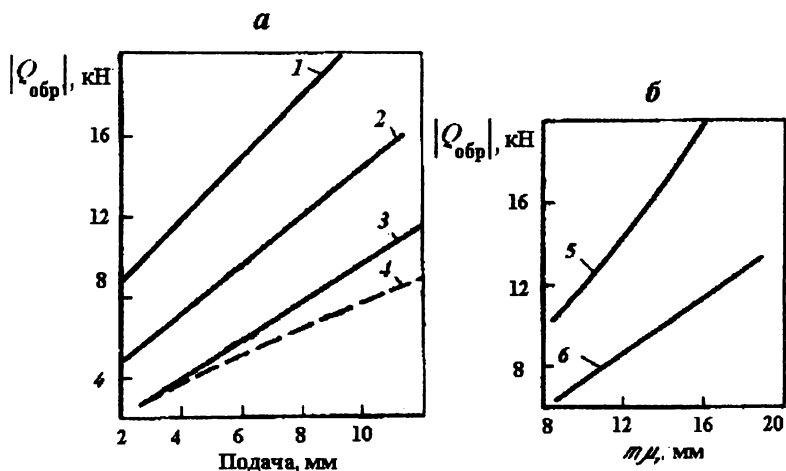


Рис. 5.9. Влияние на осевые силы подачи (а) и линейного смещения (б) при обратном ходе клетки (1–3,5,6 – сталь 1Х18Н9Т, 4 – сталь 10):

- 1 – прокатка по маршруту 51 x 1,5 → 47 x 0,6 мм ($\mu = 2,67$);
- 2 – 37 x 1 → 35,5 x 0,4 мм ($\mu = 2,56$);
- 3 – 48 x 1,1 → 45,5 x 0,5 мм ($\mu = 2,3$);
- 4 – 60 x 1,5 → 57 x 0,6 мм ($\mu = 2,6$);
- 5 – 60 x 1,0 → 57 x 0,6 мм ($\mu = 1,75$);
- 6 – 60 x 1,5 → 57 x 0,6 мм ($\mu = 2,6$)

Из формул (5.13), (5.15) и экспериментальных данных (см. рис. 5.9) видно, что на осевое усилие при роликовой прокатке оказывают влияние следующие факторы:

- увеличение коэффициента вытяжки (преимущественно по стенке), подачи и линейного смещения приводит к росту осевого усилия, так как

возрастают скорость металла в МОД, скорость скольжения и силы трения;

- упрочнение в процессе прокатки (рост сопротивления деформации и временного сопротивления) приводит к росту осевого усилия, причем при прокатке сталей более склонных к упрочнению (нержавеющих) осевое усилие больше, чем, например, углеродистых сталей (см. линии 1 и 4 на рис. 5.9, а);
- при прокатке более тонкостенных труб осевое усилие больше в связи с ростом нормальных напряжений и сил трения.

5.5. Настройка стана ХПТР

Одним из важных элементов настройки стана является обеспечение требуемого соотношения скоростей клетки и сепаратора, определяемого формулой (5.1). Для получения этого соотношения стан оборудован рычажной системой (см. рис. 5.1), состоящей из двуплечего рычага ОН, большее плечо которого соединено с клетью регулируемой по длине штангой НМ, а меньшее плечо ОК с помощью двух планок КР – с сепаратором и роликами. При движении клетки стана среднего типоразмера двуплечий рычаг совершает качательное движение вокруг оси О (в станах малых типоразмеров клеть приводится в движение от двуплечего рычага, соединенного с шатуном кривошипно-шатунного механизма). Таким образом, скорость клетки определяется длиной плеча ОН, а скорость сепаратора – длиной плеча ОК. Перемещение сепаратора зависит от места крепления планок на рычаге (положения точки К).

С учетом этого выражение (5.2.1) можно записать так:

$$\frac{v_{сеп}}{v_{кл}} = \frac{ОК}{ОН} = \frac{1}{1 + \frac{R_u}{R_k}}. \quad (5.16)$$

Изменение отношения (5.16) производится перемещением точки К, которое находится из выражения:

$$OK = \frac{OH}{1 + \frac{R_{\text{ц}}}{R_{\text{к}}}}. \quad (5.17)$$

Чтобы соотношение скоростей оставалось постоянным по ходу клетки, необходимо соблюдение второго условия: подобия треугольников ОНМ и ОКР (параллельности НМ и КР). Это достигается перемещением точки М на рабочей клетки и изменением длины тяги НМ.

Таким образом, при изменении сортамента прокатываемых труб и размеров роликов, настройка стана среднего типоразмера проводится в такой последовательности:

- 1) рассчитывается ОК по выражению (5.17);
- 2) перемещается точка К;
- 3) обеспечивается $HM \parallel KR$.

На практике длины регулируемых рычагов приводятся в таблице настройки каждого стана. Большее плечо рычага ОН и тяга сепаратора КР остаются неизменными. Установка размеров производится по метрическим шкалам, закрепленным у точек К и М и у стяжной гайки штанги НМ.

В приводе стана ХПТР 8 – 15 длина плеча КН (см. рис. 5.1) не изменяется, тем самым сохраняется постоянным ход роликов по планкам. Изменение скорости движения сепаратора, как и в первой схеме, достигается регулировкой плеча ОК, при этом изменяется длина всего рычага ОН.

5.6. Режимы прокатки

Режимы прокатки характеризуются следующими параметрами: коэффициентами вытяжки общим, по стенке и по наружному диаметру, подачей, линейным смещением, частотой движения клетки, углом кантовки.

Рекомендуемые значения коэффициентов вытяжки, подачи и частоты движения клетки указаны в п. 2.1.2 и табл. 2.1. Их влияние на производительность процесса и качество труб такое же, как на стане ХПТ (см. п. 4.5).

Угол кантовки φ_k выбирается из следующих условий [13]:

- 1) он должен обеспечивать требуемое качество труб по разностенности, так как сужающийся ручей и наличие зазоров между роликами приводят к неравномерности деформации по периметру;
- 2) должен быть минимальным из условий динамики привода механизма подачи-поворота;
- 3) не должен быть кратным полууглу охвата одним роликом:

$$\varphi_k \neq n \cdot 360^\circ / 2n_p,$$

где $n = 1, 2, \dots$

При нарушении этого условия ус, образованный в межроликовой зоне в начале хода клетки, не успевает полностью раскататься и остается на готовой трубе в виде местного утолщения в связи с тем, что через каждый ход клетки утолщение попадает вновь в межроликовую зону;

- 4) каждое сечение трубы должно быть проработано всеми роликами, то есть за период обжатия и калибровки каждого участка труба должна совершить не менее полного оборота:

$$\varphi_k \leq 360^\circ / n_k,$$

где n_k – число кантовок на длине рабочего конуса.

Для роликовой прокатки число кантовок определяется по выражению:

$$n_k = \frac{D_{on} + S_{cp}}{D_0 + S_0} \cdot \frac{1,28l_{обж}}{m\mu} \cdot \frac{R_k}{R_y} + K_n + 1,$$

где S_{cp} – средняя толщина стенки на обжимном участке; K_n – коэффициент полировки; остальные обозначения приняты ранее.

В книге [13] отмечается, что вышеприведенным условиям удовлетворяет угол поворота, равный углу развала на роликах или немного

больше его (рис. 5.5). Для трехроликовой схемы прокатки и отношения диаметров заготовки и готовой трубы $D_0/D_T = 1,05...1,15$ угол развала рекомендуется в пределах $12...18^\circ$.

5.7. Расчет поврежденности металла

За один проход ХПТР поврежденность может быть рассчитана по приближенной формуле, аналогичной формуле для ХПТ (4.70):

$$\omega = 2k_{\text{нем}} \sqrt{\frac{2m(1+2\mu_\Sigma)}{3(L_p - L_k)}} \cdot \left[\frac{\ln \mu_{D_p}}{\Lambda_{p1}} + \frac{\ln \mu_s}{\Lambda_{p2}} \right], \quad (5.18)$$

где $k_{\text{нем}} = 1,2$ – коэффициент немонотонности деформации; L_p , L_k – соответственно длины рабочего и калибрующего участков на рабочем конусе; $\mu_{D_p} = \frac{D_0 - S_0}{D_{on} + S_1}$ – коэффициент вытяжки по диаметру в зоне редуцирования; D_{on} и S_1 – соответственно диаметр оправки и толщина стенки в конце зоны редуцирования (см. п. 5.3); $\mu_s = \frac{S_1}{S_T}$ – коэффициент вытяжки по стенке в зоне обжатия; $\Lambda_{pi}(\sigma/T_i; \mu_{\sigma i})$ – пластичность металла в i -й зоне очага деформации. Остальные обозначения приняты выше.

Формула (5.18) получена из формулы (4.70) при следующих допущениях: ролики полностью охватывают трубу, отсутствует зона выпусков калибра, меньше немонотонность деформации.

Характеристики зон очага деформации:

$i=1$ – зона редуцирования ($\sigma/T_1 = -0,5$; $\mu_{\sigma 1} = 0,2$);

$i=2$ – зона обжатия стенки ($\sigma/T_2 = -2,7$; $\mu_{\sigma 2} = 0$);

Пластичность рассчитывается по формуле (1.5) с использованием данных табл. 1.3.

Оценку накопленной величины поврежденности можно сделать по критериям (1.7) и (1.8).

5.8. Технологические ограничения

Так же, как и при рассмотрении станов ХПТ, проверяется несколько групп ограничений.

Для обеспечения устойчивого процесса прокатки должны выполняться **геометрические ограничения**, которые учитываются при расчете калибровки инструмента. Запишем их еще раз.

Зазор для введения оправки должен находиться в диапазоне

$$\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - D_{on} = [0,5 \dots 2,0] \text{ мм.}$$

Меньшие зазоры выбираются для труб с меньшими размерами.

Во избежание проскальзывания ролика относительно трубы рассчитанная величина катающего радиуса R_k должна находиться в пределах

$$R_g < R_k < R_p,$$

где R_g – радиус ролика по вершине калибра; R_p – радиус ролика по реборде.

Прочностные ограничения проверяются на основе расчета силовых параметров.

Усилие, действующее на ролик, не должно превышать максимально возможное по технической характеристике стана:

$$P_{\max} \leq [P], \quad (5.19)$$

где $[P]$ можно принять по табл. 2.1.

При невыполнении условия (5.19) надо уменьшить величину подачи без большого ущерба для производительности и повторить расчеты.

Для предотвращения стыковки труб, особенно при обратном ходе клетки, и потери устойчивости трубы в виде «гармошки» максимальное осевое усилие, рассчитанное по формуле (5.15), проверяется по выражению:

$$\frac{|Q_i^{\max}|}{F_0} \leq 0,8\sigma_{0,2}, \quad (5.20)$$

где F_0 – площадь поперечного сечения прокатываемой заготовки; $\sigma_{0,2}$ – предел текучести металла заготовки, определяется по табл. 1.3.

Для снижения осевого усилия при нарушении условия (5.20) часто достаточно уменьшить величину подачи.

Далее проверяются ограничения, обеспечивающие требуемое *качество* труб.

Для получения точных размеров труб ограничивают значение коэффициента полировки:

$$\frac{L_k}{m\mu_z} = [k_n], \quad (5.21)$$

где L_k – длина калибрующего участка на рабочем конусе с учетом формулы (5.4); $[k_n] = 4 \dots 5$ – коэффициент полировки.

Качество труб оценивают также по величине накопленной поврежденности, рассчитанной по формуле (5.18). В связи с тем, что на станках ХПТР прокатывают в основном трубы ответственного назначения, поврежденность не должна превышать первое пороговое значение по (1.7):

$$\omega \leq \omega^*,$$

что обеспечивает полное залечивание поврежденности при заключительной термической обработке и не ухудшает эксплуатационные свойства труб.

Расчетная производительность (4.68) не должна быть меньше рекомендованной: 20 – 30 м/ч.

6. Волочение труб

6.1. Калибровка трубоволоочильного инструмента

Трубоволоочильный инструмент – это волоочильные кольца (волоки) и оправки. Инженер-технолог должен уметь назначать технологические параметры и размеры инструмента для получения труб заданного размера и качества.

6.1.1. Волоки

Волока представляет собой кольцо с коническим калиброванным каналом, выходное отверстие которого соответствует форме и размерам наружного контура получаемой трубы (рис. 6.1). В дальнейшем будем рассматривать волочение круглых труб. Для волочения профильных труб (овальных, квадратных и др.) канал волокни имеет более сложную конфигурацию, вопросам волочения профильных труб посвящена специальная литература, например книга [6].

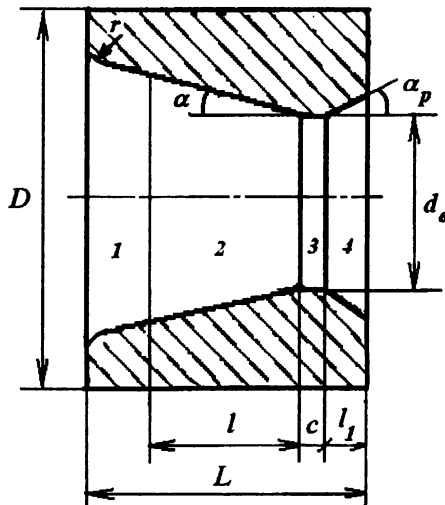


Рис. 6.1. Эскиз волокни

Рабочий канал волокна состоит из следующих участков (см. рис. 6.1): входного конуса 1 для плавного захода исходной заготовки; рабочего конуса 2, на котором происходит обжатие трубы; цилиндрического калибрующего пояса 3; выходного конуса 4.

Основные технологические параметры волокна следующие:

- радиус кривизны R , характеризующий профиль рабочего конуса;
- угол конусности рабочего конуса α ;
- диаметр выходного отверстия d_g ;
- материал волокна;
- длина калибрующего пояса C .

Рассмотрим выбор перечисленных технологических параметров.

Обычно используют волокна с прямолинейной образующей рабочего конуса, радиус кривизны которого $R = \infty$, что облегчает его обработку.

Однако иногда применяют волокна с криволинейными образующими. Радиально-выпуклый профиль применяют для повышения точности наружного диаметра труб при безоправочном волочении за счет уменьшения усадки диаметра. Радиально-вогнутый профиль позволяет выполнить рабочий конус как одно целое с калибрующим пояском, что обеспечивает меньший износ волокна и увеличивает ее стойкость. Вогнуто-выпуклый (сигмаидальный) профиль наиболее полно соответствует траектории течения металла при волочении, что позволяет снизить усилие волочения и износ волокна.

Угол конусности α выбирается из условия минимального усилия волочения. Экспериментально и теоретически установлено, что минимальное усилие волочения труб достигается при углах $\alpha_{\text{опт}} = 12...15^\circ$. Типичная зависимость усилия волочения от угла конусности приведена на рис. 6.2. Чаще применяют углы $\alpha = 12...13^\circ$. Возрастание усилия волочения при углах $\alpha \ll 12^\circ$ объясняется увеличением длины очага деформации и доли

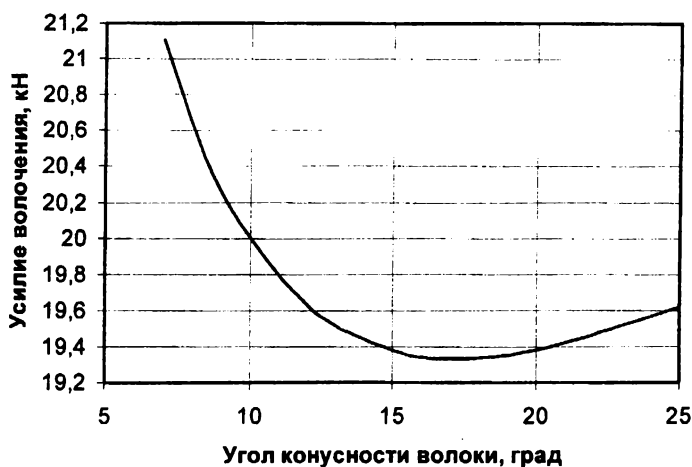


Рис. 6.2. Влияние угла конусности волокна на усилие безоправочного волочения 25 x 2 → 20 x 2,1 мм (сталь 20)

сил трения на контактной поверхности. При углах конусности $\alpha \gg 15^\circ$ возрастание усилия волочения объясняется ростом доли лобовых сопротивлений волокна.

Диаметр выходного отверстия волокна обычно принимается равным диаметру готовой трубы: $d_g = D_T$. При длиннооправочном волочении труб готового размера учитывают подъем наружного диаметра при обкатке и принимают

$$d_g = D_T - 0,01 \cdot D_T = 0,99 D_T. \quad (6.1)$$

При безоправочном волочении труб некоторых типоразмеров учитывают изменение диаметра:

$$d_g = D_T \pm \Delta D_T, \quad (6.2)$$

где при волочении толстостенных труб происходит некоторая усадка диаметра, и принимают $+\Delta D_T$; в случае получения тонкостенных труб учитывают подъем диаметра и принимают $-\Delta D_T$.

Однако чаще всего корректировки по формулам (6.1) и (6.2) не выводят размеры труб за пределы допускаемых отклонений, поэтому учитываются при изготовлении труб повышенной точности.

Материалы, из которых изготавливаются волокна, выбираются в зависимости от материала протягиваемых труб.

Волокна из сталей Р6М5, У8А, 9ХС и др. применяются для волочения труб из мягких материалов, в основном из цветных металлов: меди, алюминия и др. Размеры стальных волокон в зависимости от диаметра выходного отверстия d_s [2] приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Размеры стальных волокон, мм

Элемент волоки	Диаметр выходного отверстия d_s							
	4–19	20–29	30–39	40–49	50–59	60–69	70–79	80–100
C	3	4	5	6	6	6	6	7-8
l_l	5	6	7	8	8	8	8	8
D	60	60	110	110	150	200	200	250
L	40	40	50	50	60	60	70	80

В большинстве случаев для волочения стальных труб применяются волокна из твердых спеченных сплавов ВК6, ВК8, ВК15 по ГОСТ 2330-76. В маркировке этих сплавов цифра – процентное содержание кобальта, остальное – карбиды вольфрама. Размеры твердосплавных волокон в зависимости от диаметра выходного отверстия d_s по ГОСТ 2330-76 приведены в табл. 6.2., где для волочения трубы одного размера можно выбрать короткую или длинную волоку (по размеру L). При этом необходимо, чтобы длина волокна была больше длины рабочего конуса l (см. рис. 6.1). Волокна из твердых сплавов отличаются высокой твердостью и износостойкостью, а также хрупкостью. В связи с этим, во избежание разрушения волокна под действием давлений при волочении, волокна запрессовывают в стальные обоймы. Для изготовления обойм применяют высокоуглеродистые стали (35, 45, 50) и стали типа У8, У9, ШХ6.

Для волочения тонкостенных капиллярных труб диаметром $D_T \leq 3,5$ мм применяют волокна, сделанные из синтетических алмазов, которые отличаются очень высокой твердостью и адгезионной стойкостью по отношению к металлам. Однако в связи с хрупкостью такие волокна также помещают в двухслойную медно-стальную обойму.

Таблица 6.2

Размеры волокон из твердого сплава, мм

d_s	D	L	C	l_l	r
3,3-5,5	20±0,7	13±0,6	1,5	3	4
6-14	30±0,7	18±0,6	1,8	2	4
	35±1	35±1	2,2	3	4
10-18	45±1	40±1	2,5	4,5	4
14-20	45±1	20±0,6	2,2	3	4
21-26	45±1	20±0,6	2,2	3	4
19-25	60±1,2	45±1	2,7	6	5
26-36	60±1,2	20±0,7	2,5	3,5	5
29-34	70±1,2	50±2	2,4	6	5
34-41	75±1,2	25±1,2	2,4	6	6
	75±1,2	45±1,5	2,4	6	6
35-42	85±1,5	60±2	3	6	6
42-50	85±1,5	45±1,5	3	6	6
51-62	90±1,5	45±1,5	3	6	7
43-51	100±1,5	60±2	3	6	7
63-73	110±1,5	45±1,5	4	6	8
75-85	120±1,5	45±1,5	4,6	6	8
86-92	130±2	45±1,5	4,6	6	8
92-102	140±2	45±1,5	4,6	6	8

Длина калибрующего пояса волокна обычно составляет 2–4 мм и выбирается по табл. 6.1 и 6.2. Калибрующий пояс должен обеспечить

требуемую точность труб, но, с другой стороны, увеличение его длины приводит к росту усилия волочения. Рекомендуется длину выбирать в зависимости от толщины стенки трубы. Для труб среднего сортамента

$$C = (2 \dots 4)S_T = 1 \dots 10 \text{ мм.} \quad (6.3)$$

При длиннооправочном волочении рекомендуется уменьшать калибрующий пояс, чтобы снизить вероятность поломки оправок при схеме толкания за задний торец оправки:

$$C = (1 \dots 2)S_T = 1 \dots 2,5 \text{ мм.} \quad (6.4)$$

Угол выходного конуса $\alpha_p = 30 \dots 45^\circ$ для предотвращения выкрашивания острых кромок.

6.1.2. Оправки

Волочильные оправки используют для утонения стенки трубы. В соответствии со способами волочения используют короткие закрепленные, самоустанавливающиеся и длинные подвижные оправки (рис. 6.3).

Короткие оправки (1, 2, рис. 6.3). Применяются для короткооправочного волочения и закрепляются на стержне. Конструктивно они могут быть полыми и сплошными. По форме различаются цилиндрические и цилиндроконические оправки, которые характеризуются диаметром и длиной. Длина оправки должна быть больше суммарной длины зоны обжатия и калибрующего пояса волокна (см. рис. 6.1):

$$\ell_{on} \geq \ell + c = \frac{D_0 - D_T}{2 \operatorname{tg} \alpha} + c.$$

Диаметр цилиндрической оправки равен внутреннему диаметру готовой трубы:

$$D_{on} = D_T - 2S_T. \quad (6.5)$$

Необходимо учитывать возможность введения оправки в исходную заготовку:

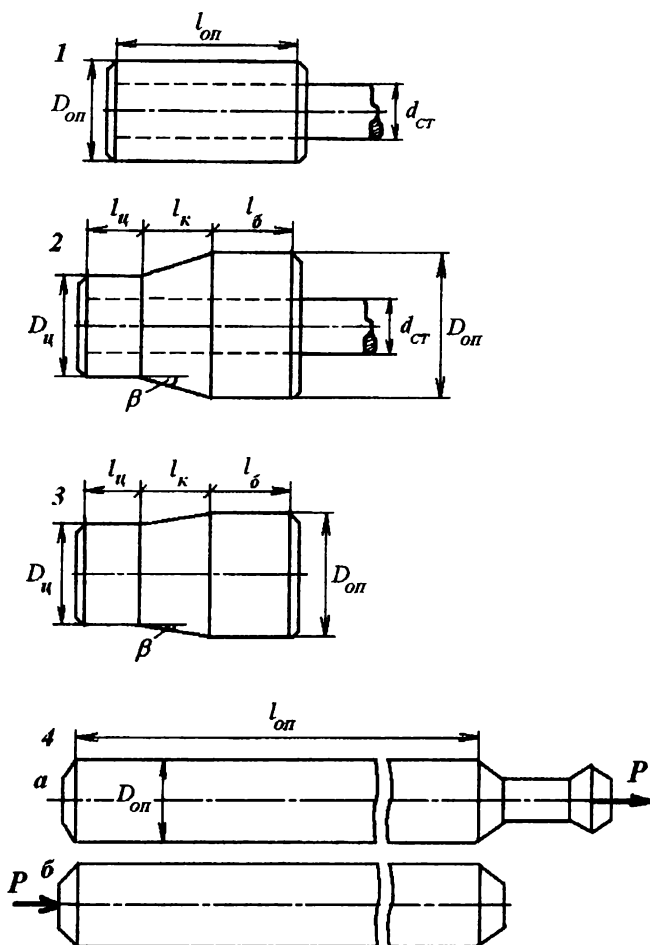


Рис. 6.3. Волоочильные оправки: 1, 2 – короткие закрепленные; 3 – самоустанавливающаяся; 4 – длинные

$$D_{оп} = D_0 - 2S_0 - \Delta_1, \quad (6.6)$$

где $\Delta_1 = 0,3 \dots 5$ мм – зазор для ввода оправки. Причем если зазор получился $\Delta_1 > 5$ мм, то необходимо либо уменьшить диаметр исходной заготовки, либо перейти на цилиндро-коническую оправку, где зазор уменьшается за счет введения конического участка.

Под действием сил трения в стержне, к которому крепится оправка, возникает растягивающее усилие, которое проверяется на устойчивость к пластическим деформациям. Колебания стержня могут вызвать кольцевые отпечатки на поверхности труб.

Для уменьшения осевого усилия используют цилиндро-конические оправки (2, рис. 6.3), состоящие из трех участков: нерабочего цилиндрического (бочки) длиной l_b , конического длиной l_k и цилиндрического длиной l_y . Введение конического участка обеспечивает снижение осевого усилия на стержень за счет противоположно направленной горизонтальной проекции нормальной силы. Это уменьшает вероятность образования кольцевых отпечатков. Конический участок имеет конусность с углом $\beta = 4 \dots 6^\circ$.

Диаметр бочки определяется с учетом зазора для ввода оправки по формуле (6.6).

Диаметр цилиндрического участка равен внутреннему диаметру готовой трубы и рассчитывается по формуле

$$D_y = D_T - 2S_T. \quad (6.7)$$

Длина конического участка рассчитывается по формуле:

$$l_k = \frac{D_{on} - D_y}{2 \operatorname{tg} \beta}. \quad (6.8)$$

Длины l_b и l_y определяются конструктивно, но длина цилиндрического участка должна быть больше калибрующего пояса волокна:

$$l_y > c. \quad (6.9)$$

Самоустанавливающиеся оправки (3, рис. 6.3). Отличаются от цилиндро-конических закрепленных оправок отсутствием стержня. Могут иметь небольшой хвостовик для повышения устойчивости оправки и удобства изготовления. Некоторые размеры оправки выбираются из условия устойчивости оправки в очаге деформации. Исследования показали, что угол

конусности оправки должен быть несколько меньше угла конусности волоки, но больше угла конусности закрепленной оправки:

$$\beta = \alpha - (2...4)^{\circ}. \quad (6.10)$$

Диаметры оправки определяются по формулам (6.6), (6.7), где выбирается меньший зазор для ввода оправки: $\Delta_I = 0,5...1$ мм для труб среднего сортамента, а для труб $D_T < 5$ мм – до 0,1 мм. Для фиксации оправки в волоке после окончания волочения требуется:

$$D_{on} \geq d_{\phi} + (0,05...0,5) \text{ мм}. \quad (6.11)$$

При расчете длины цилиндрического участка условие (6.9) уточняется:

$$\ell_{\text{ч}} > c + \frac{S_0 - S_T}{\text{tg}\beta} + (1...4) \text{ мм}. \quad (6.12)$$

Длина бочки выбирается конструктивно. Короткие оправки изготавливают из сталей и твердых сплавов.

Длинные оправки (4, рис. 6.3). Оправка представляет собой длинный цилиндрический стержень, диаметр оправки равен внутреннему диаметру готовой трубы (6.5). При получении высокоточных труб учитывают подъем внутреннего диаметра при обкатке:

$$D_{on} = D_T - 2S_T - 0,01 \cdot D_T.$$

Проверяют также наличие зазора для введения оправки в заготовку по выражению (6.6).

Длина рабочей части оправки должна соответствовать длине готовой трубы:

$$L_{on} = L_T + (0,5...1) \text{ м}. \quad (6.13)$$

Увеличение длины оправки связано с возможностью перемещения трубы относительно оправки, а также позволяет протягивать трубы с разной толщиной стенок.

Применяются две схемы длиннооправочного волочения: путем приложения усилия волочения P к хвостовику оправки (4а, рис. 6.3) и к заднему торцу оправки (4б, рис. 6.3). Конструкции оправок для этих схем

различаются хвостовой частью, причем во второй схеме на конус заправляются оба торца оправки, и волочение может производиться в обоих направлениях.

Длинные оправки изготавливаются из сталей У8А, 60С2, ШХ 15, 65Г.

Для изготовления волочильного инструмента целесообразно использовать металлокерамику на основе окислов циркония или алюминия [2]. Керамический инструмент инертен к металлу трубы, что исключает налипание, образование рисок и позволяет получать волочением трубы из сплавов, склонных к налипанию (коррозионно-стойких сталей, циркониевых, титановых сплавов и др.).

6.2. Расчет усилий волочения

Расчет усилия волочения необходим для оценки энергоемкости процесса, для выбора типоразмера волочильного стана. Исходными данными для расчета являются марка стали или сплава, их технологические свойства (сопротивление деформации (1.1), временное сопротивление (1.2)), исходные и конечные размеры трубы, параметры калибровки инструмента, условия трения на контактных поверхностях.

Усилие волочения зависит от следующих основных факторов:

- сопротивления деформации металла σ_s , связанного с маркой сплава, накопленной степенью деформации, упрочнением;
- коэффициента вытяжки μ , который определяет накопленную степень деформации;
- длины калибрующего пояска волокна C , определяющего силы трения;
- угла конусности волокна α (зависимость неоднозначна, см. рис. 6.2);
- типа смазки, стойкости подсмазочного покрытия, чистоты обработки поверхностей инструмента, от которых зависит коэффициент трения f .

При увеличении σ_s, μ, C, f усилие волочение возрастает.

В меньшей степени усилие волочения зависит от скорости волочения, правильности настройки и состояния механизмов стана и других факторов.

Рассчитывают следующие параметры:

- усилие волочения P ;
- напряжение волочения $\sigma_{\text{вол}} = P/F_T$, где F_T – площадь поперечного сечения готовой трубы;
- относительное напряжение волочения $\sigma_{\text{вол}}/\sigma_s$;
- осевое усилие $Q_{\text{СТ}}$, действующее на стержень закрепленной оправки.

Хорошее соответствие экспериментальным данным показали формулы

Р. Б. Красильщикова для разных способов волочения:

$$P_{\text{БО}} = 1,2\bar{\sigma}_s \frac{(tg\alpha + f)}{(1 - f \cdot tg\alpha)tg\alpha} \cdot F_T \cdot \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (6.14)$$

$$P_{\text{КО}} = 1,05\bar{\sigma}_s \left[\frac{tg\alpha + f}{(1 - f \cdot tg\alpha)tg\alpha} + \frac{fD_T}{tg\alpha(D_T - S_T)} \right] \cdot F_T \cdot \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (6.15)$$

$$P_{\text{ДО}} = 1,75\bar{\sigma}_s \left[\frac{tg\alpha + f}{(1 - f \cdot tg\alpha)tg\alpha} - \frac{fD_T}{tg\alpha(D_T - S_T)} \right] \cdot F_T \cdot \frac{\varepsilon}{100\%}, \quad (6.16)$$

где $\bar{\sigma}_s = \frac{\sigma_{s0} + \sigma_{sT}}{2}$ – среднее временное сопротивление; составляющие определяются по формуле (1.2) и табл. 1.3; $\alpha = 12-13^\circ$ – угол конусности волокна; $f = 0,06-0,08$ – коэффициент трения; F_T – площадь поперечного сечения готовой трубы; $\varepsilon, \%$ – относительное обжатие поперечного сечения трубы (1.3).

Известна формула Е. Зибеля для безоправочного волочения:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{вол}}}{\sigma_s} \right)_{\text{БО}} = \ln \mu \left(1 + \frac{2f}{\sin 2\alpha} \right), \quad (6.17)$$

где сопротивление деформации σ_s определяется с учетом упрочнения по формуле (1.1).

При использовании формулы (1.1) для расчета σ_s накопленную за проход волочения степень деформации сдвига можно определить по выражению

$$\Lambda = 2tg\alpha + 2\sqrt{\ln \mu_D^2 + \ln \mu_D \ln \mu_s + \ln \mu_s^2}, \quad (6.18)$$

где первое слагаемое соответствует накопленной деформации на линиях разрыва касательной составляющей скорости (вход и выход из очага деформации); второе слагаемое определяет накопленную деформацию в зоне обжатия.

В случае безоправочного волочения формулу (6.18) можно упростить, учитывая, что при БО $\ln \mu_s \approx 0$:

$$\Lambda = 2tg\alpha + 2\sqrt{\ln \mu_D^2} = 2(tg\alpha + \ln \mu_D). \quad (6.19)$$

Для расчета растягивающего усилия, действующего в стержне закрепленной оправки, можно использовать формулу Л. Е. Альшевского:

$$Q_{ст} = \frac{\sigma_{сш}}{\Phi - 1} \cdot \left(\frac{D_T - 2S_T}{D_T} \right) \cdot \frac{f}{tg\alpha} \left[1 - \frac{(D_T - S_T)S_T}{(D_T + S_0 - 2S_T)S_0} \right] \cdot (D_T - S_T)S_T, \quad (6.20)$$

где
$$\Phi = \frac{f + tg\alpha}{(1 - ftg\alpha)tg\alpha} + \left(\frac{D_T - 2S_T}{D_T} \right) \cdot \frac{f}{tg\alpha}.$$

Пример 16. Рассчитаем усилия волочения по формулам (6.14)...(6.16).
Исходные данные: безоправочное волочение по маршруту $25 \times 2 \rightarrow 20 \times 2,1$ мм (сталь 20), угол конусности волокна $\alpha = 12^\circ$; коэффициент трения $f = 0,08$.
Площади поперечного сечения исходной заготовки и готовой трубы:

$$F_0 = \pi \cdot S_0 (D_0 - S_0) = \pi \cdot 2(25 - 2) = 144,5 \text{ мм}^2;$$

$$F_T = \pi \cdot S_T (D_T - S_T) = \pi \cdot 2,1(20 - 2,1) = 113,1 \text{ мм}^2.$$

Относительное обжатие поперечного сечения:

$$\varepsilon = (F_0 - F_T) \cdot 100 / F_0 = 27,8 \text{ \%}.$$

Временное сопротивление металла трубы по (1.2):

$$\sigma_{\sigma T} = \sigma_{\sigma_0} + q\varepsilon_i^b = 500 + 5,7(27,8)^{0,98} = 648 \text{ МПа.}$$

Среднее временное сопротивление за проход волочения:

$$\bar{\sigma}_{\sigma} = \frac{\sigma_{\sigma T} + \sigma_{\sigma 0}}{2} = \frac{500 + 648}{2} = 574 \text{ МПа.}$$

Подставим найденные значения в формулу (6.14):

$$P_{\text{БО}} = 1,2 \cdot 574 \cdot \frac{(\operatorname{tg} 12^0 + 0,08)}{(1 - 0,08 \cdot \operatorname{tg} 12^0) \operatorname{tg} 12^0} \cdot 113,1 \cdot \frac{27,8}{100\%} = 30302 \text{ Н} = 30,3 \text{ кН.}$$

Для короткооправочного волочения $25 \times 2 \rightarrow 20 \times 1,7$ мм (сталь 20) угол конусности волокна $\alpha = 12^0$; коэффициент трения $f = 0,08$, используем формулу (6.15).

Площадь поперечного сечения готовой трубы:

$$F_T = \pi \cdot S_T (D_T - S_T) = \pi \cdot 1,7(20 - 1,7) = 97,7 \text{ мм}^2.$$

Относительное обжатие поперечного сечения:

$$\varepsilon = (F_0 - F_T) \cdot 100 / F_0 = 47,9 \%,$$

где F_0 определена в предыдущем примере.

Временное сопротивление металла трубы по (1.2):

$$\sigma_{\sigma T} = \sigma_{\sigma_0} + q\varepsilon_i^b = 500 + 5,7(47,9)^{0,98} = 752,5 \text{ МПа.}$$

Среднее временное сопротивление за проход волочения:

$$\bar{\sigma}_{\sigma} = \frac{\sigma_{\sigma T} + \sigma_{\sigma 0}}{2} = \frac{500 + 752,5}{2} = 626,3 \text{ МПа.}$$

Подставим найденные значения в формулу (6.15):

$$P_{\text{КО}} = 1,05 \cdot 626,3 \cdot \left[\frac{\operatorname{tg} 12^0 + 0,08}{(1 - 0,08 \cdot \operatorname{tg} 12^0) \operatorname{tg} 12^0} + \frac{0,08 \cdot 20}{\operatorname{tg} 12^0 (20 - 1,7)} \right] \cdot 97,7 \cdot \frac{47,9}{100\%} = 55722 \text{ Н} = 55,7 \text{ кН.}$$

Аналогично рассчитывается усилие длиннооправочного волочения по формуле (6.16):

$$P_{до} = 1,75 \cdot 626,3 \cdot \left[\frac{tg12^0 + 0,08}{(1 - 0,08 \cdot tg12^0)tg12^0} - \frac{0,08 \cdot 20}{tg12^0(20 - 1,7)} \right] \cdot 97,7 \cdot \frac{47,9}{100\%} =$$

$$= 50694 \text{ Н} = 50,7 \text{ КН.}$$

Из расчетов видно, что наибольшее усилие необходимо для волочения на короткой удерживаемой оправке, а наименьшее – без оправки:

$$P_{КО} > P_{до} > P_{БО}.$$

Пример 17. Рассчитаем для тех же исходных данных осевое усилие, действующее в стержне короткой закрепленной оправки, по формуле (6.22).
Напряжение волочения:

$$\sigma_{ос} = \frac{P_{КО}}{F_T} = \frac{55722}{97,7} = 570,3 \text{ МПа.}$$

Параметр Φ :

$$\Phi = \frac{0,08 + tg12^0}{(1 - 0,08 \cdot tg12^0)tg12^0} + \left(\frac{20 - 2 \cdot 1,7}{20} \right) \cdot \frac{0,08}{tg12^0} = 1,71.$$

Окончательно имеем:

$$Q_{сг} = \frac{570,3}{1,71 - 1} \cdot \left(\frac{20 - 2 \cdot 1,7}{20} \right) \cdot \frac{0,08}{tg12^0} \left[1 - \frac{(20 - 1,7) \cdot 1,7}{(20 + 2 - 2 \cdot 1,7) \cdot 2} \right] \cdot (20 - 1,7) \cdot 1,7 =$$

$$= 25460 \text{ Н} = 25,4 \text{ КН.}$$

Более точный расчет усилий волочения можно сделать с помощью экспертной системы проектирования технологии изготовления холоднодеформированных труб, разработанной при участии автора в УГТУ–УПИ [9].

6.3. Расчет производительности станов

Производительность современных автоматизированных станов прямолинейного волочения определяется технологическими параметрами и быстродействием механизмов на входной и выходной сторонах и рассчитывается по формуле:

$$\Pi = \frac{3600}{T_{\text{ц}}} L_T \cdot n \cdot k_1 \cdot k_2, \text{ м/ч},$$

где $T_{\text{ц}} = \frac{L_T}{v_{\text{воз}}} + \frac{L_T}{v_{\text{вол}}} + \Sigma T$ – время цикла; L_T – длина готовой трубы, м; $v_{\text{воз}}$ и

$v_{\text{вол}}$ – соответственно скорости волочения и возврата волочильной тележки, м/с; n – число ниток волочения; k_1 – коэффициент использования стана ($k_1 = 0,85$ для станов усилием 50...150 КН; $k_1 = 0,80$ для станов усилием 750...1500 КН); k_2 – коэффициент, учитывающий разность длин одновременно протягиваемых труб ($k_2 = 0,85$ для трехниточного стана и $k_2 = 0,90$ для двухниточного стана); $\Sigma T, c$ – сумма постоянных потерь во время цикла.

Технологические параметры станов $v_{\text{воз}}$, $v_{\text{вол}}$, ΣT берутся из технических паспортов станов. За неимением производственных данных можно использовать данные табл. 6.3.

Таблица 6.3

Технические характеристики линейных трубоволочильных станов [2]

Параметры	Усилие волочения, кН							
	ВСТ-10	ВСТ-30	ВСТ-50	ВСТ-100	ВСТ-150	ВСТ-300	ВСТ-500	ВСТ-750
d_T , мм	0,4-1	3-10	8-35	10-40	15-65	30-90	40-110	40-120
L_T , м	9	9	12	15	16	12	12	12
$V_{\text{вол}}$, м/с	1,1	0,83	0,9	1,2	0,9	0,9	0,83	0,75
$V_{\text{воз}}$, м/с	1,67	1,67	1,84	1,40	1,84	1,84	1,17	1,17
Способы	БО	БО	БО, КО	БО, КО	БО, КО	КО	КО	КО
ΣT , с	2	2	2	3	3	5	8	10

Производительность трехниточных линейных станов может достигать 5000 м/ч.

Производительность барабанных станов для бухтового БО и СО волочения больше, чем линейных, и достигает 13000 м/ч за счет сокращения холостого периода цикла и большей длины трубы. Технические характеристики некоторых барабанных станов приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Технические характеристики барабанных волочильных станов [2]

Параметры	ВСТ 1/750	ВСТ 1/1000	ВСТ 1/1500
Усилие волочения при $v_{\text{вол}} = 100$ м/мин, кН	15	25	80
Скорость волочения, м/мин	100-540	85-540	41-575
Диаметр барабана, мм	750	1000	1500
Диаметр трубы, мм	1,2-8	5-15	8-45
Наибольшая длина бухты, м	2300	800	600
Производительность, тыс. м/ч	13	11	9,5

6.4. Расчет поврежденности

При волочении поврежденность в каждом проходе определяется суммированием на отдельных участках очага деформации и линиях разрыва касательной составляющей скорости (границах). Для расчета необходимо определить параметры напряженно-деформированного состояния на этих участках. Точный расчет возможен только с применением ЭВМ [9,11]. Ниже приведен упрощенный расчет, пригодный для инженерных оценок возможности разрушения при волочении.

Поврежденность за один проход безоправочного волочения можно рассчитать по формуле [2]:

$$\omega = \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Lambda_{p1}} + \frac{2 \ln \frac{D_0}{D_T}}{\Lambda_{p2}} \right)^a + \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Lambda_{p3}} \right)^a. \quad (6.21)$$

При оправочном волочении для расчета поврежденности можно использовать формулу:

$$\omega = \left(\frac{\operatorname{tg} \alpha}{\Lambda_{p1}} + \frac{2 \ln \frac{D_0}{D_T - 2S_T + S_0}}{\Lambda_{p2}} \right)^a + \left(\frac{\operatorname{tg}(\alpha/2)}{\Lambda_{p3}} + \frac{2 \ln \frac{S_0}{S_T}}{\Lambda_{p4}} + \frac{\operatorname{tg}(\alpha/2)}{\Lambda_{p5}} \right)^a, \quad (6.22)$$

где $\alpha = 12 \dots 13^\circ$ – полуугол конусности волоки; $\Lambda_{pi}(\sigma/T_i; \mu_{\sigma i})$ – пластичность металла в i -й зоне очага деформации.

Характеристики зон очага деформации:

$i=1$ – плоскость входа в очаг деформации ($\sigma/T_1 = -0,58$; $\mu_{\sigma 1} = 0,5$);

$i=2$ – зона редуцирования ($\sigma/T_2 = \frac{1-3\bar{z}^3}{\sqrt{3+9\bar{z}^6}}$, где $\bar{z} = \frac{D_0 + D_T}{2D_0}$; $\mu_{\sigma 2} = 0,5$);

$i=3$ – плоскость выхода из очага деформации для БО и граница зон редуцирования и обжатия стенки для оправочного волочения ($\sigma/T_3 = \frac{1-3z^3}{\sqrt{3+9z^6}}$, где $z = \frac{D_T}{D_0}$; $\mu_{\sigma 3} = 0,5$);

$i=4$ – зона обжатия стенки ($\sigma/T_4 = 2 \left(1 - 3 \sqrt{\frac{D_T}{D_0}} \right) \cdot \frac{S_0 + S_T}{2S_0} + 3$; $\mu_{\sigma 4} = 0$);

$i=5$ – плоскость выхода из очага деформации ($\sigma/T_5 = 2 \left(1 - 3 \sqrt{\frac{D_T}{D_0}} \right) \cdot \frac{S_T}{S_0} + 3$; $\mu_{\sigma 5} = 0$).

Пластичность рассчитывается по формуле (1.5) с использованием данных табл. 1.3. Показатель a рассчитывается по формуле (1.6) при среднем значении σ/T соответствующей скобки.

В формулах (6.21), (6.22) выражения в числителях слагаемых соответствуют накопленной степени деформации сдвига в каждой из зон.

В приведенных формулах не в полной мере учтено влияние калибровки инструмента (оправки), относительной толстостенности, неравномерности распределения по толщине стенки заготовки и др.

Росту поврежденности способствуют следующие факторы:

- снижение пластичности металла, Λ_{pi} ;
- рост накопленной степени деформации сдвига и коэффициентов вытяжки;
- увеличение напряжений контактного трения за счет некачественных смазок и полировки инструмента;
- увеличение толстостенности заготовки;
- наибольшая поврежденность имеет место на внутренней поверхности труб.

6.5. Проверка технологических ограничений

Так же, как и при холодной прокатке, рассматривается несколько групп ограничений.

Для обеспечения устойчивого процесса волочения должны выполняться *геометрические ограничения*.

Проверяется зазор для введения оправки:

$$\Delta_1 = D_0 - 2S_0 - D_{оп},$$

где $\Delta_1 = 0,3...5$ мм – рекомендуемый зазор для волочения на оправке, кроме самоустанавливающейся; $\Delta_1 = 0,5...1$ мм – зазор для волочения на СО оправке (труб среднего сортамента).

Для корректировки зазора можно изменить размеры заготовки либо использовать цилиндро-коническую оправку взамен цилиндрической (в случае КО волочения).

Для обеспечения устойчивости СО оправки проверяют условия (6.10)...(6.12), а также правильность выбора длины конической части оправки [2]:

$$\ell_{\kappa}^{\min} < \ell_{\kappa} < \ell_{\kappa}^{\max}, \quad (6.23)$$

где

$$\ell_{\kappa}^{\min} = \frac{(D_0 - 2S_0) - (D_T - 2S_T)}{2tg\beta} - \frac{(D_0 - D_T)(1 - ctg\alpha \cdot tg\beta) - 2S_0 + 2S_T \cdot (1 + tg^2\beta)}{2(tg\alpha - tg\beta)}$$

ограничивает область посадки внутренней поверхности трубы на бочку

$$\text{оправки; } \ell_{\kappa}^{\max} = \frac{(D_0 - 2S_0) - (D_T - 2S_T) - \Delta_1}{2tg\beta} \quad \text{обеспечивает введение}$$

оправки в трубу.

При нарушении условий (6.10)...(6.12), (6.23) следует изменить калибровку оправки.

Прочностные ограничения проверяются на основе расчета силовых параметров.

Усилие волочения, рассчитанное по формулам (6.14)...(6.16) либо по иным методикам, не должно превышать максимально допустимое, указанное в паспорте (технической характеристике) стана:

$$n \cdot P \leq 0,75[P], \quad (6.24)$$

где n – число ниток волочения; $[P]$ можно принять по табл. 6.3, 6.4.

Для предотвращения колебания стержня при КО осевое усилие, рассчитанное по формуле (6.20), проверяется по выражению:

$$\frac{Q_{cm}}{F_{cm}} \leq 0,8\sigma_{0,2(cm)}, \quad (6.25)$$

где F_{cm} – площадь поперечного сечения стержня (он может быть трубчатым); $\sigma_{0,2(cm)}$ – предел текучести металла стержня, определяется по табл. 1.3.

При нарушении условия (6.25) необходимо либо уменьшить коэффициент вытяжки, либо использовать стержень большего поперечного сечения с большим пределом текучести.

Для уменьшения вероятности обрывности труб проверяется относительное напряжение волочения:

$$\left(\frac{\sigma_{\text{вол}}}{\sigma_s} \right) \leq 0,85. \quad (6.26)$$

При невыполнении условия (6.26) необходимо снизить коэффициент вытяжки.

Ограничения, связанные с обеспечением требуемого качества труб, определены нормативными документами по точности, физико-механическим свойствам, качеству поверхности и др.

Например, можно использовать следующую регрессионную зависимость В. Р. Кучеренко, связывающую поперечную разностенность готовой трубы δ_{s1} с различными технологическими факторами:

$$\delta_{s1} = 1,727 + \delta_{s0} (1,678 - 0,246 \frac{D_0}{D_T} - 16,494 \frac{S_0}{D_0} + 69,167 \left(\frac{S_0}{D_0} \right)^2 - 0,003 \varepsilon), \quad (6.27)$$

где δ_{s0} – поперечная разностенность исходной заготовки, %;

$\varepsilon = \frac{D_0 - D_T}{D_0} 100\%$ – относительное обжатие трубы по диаметру.

Ожидаемая поперечная разностенность (на одну сторону) по (6.27) не должна быть больше предельных отклонений на толщину стенки:

$$\delta_{s1}/2 \leq [\delta_{s\min}]. \quad (6.28)$$

На точность труб влияет длина калибрующего пояса волокна, определяемая в зависимости от толщины стенки по формулам (6.3), (6.4). При длине калибрующего пояса меньше рекомендованной возможно снижение точности, а при больших значениях – возрастание усилия волочения.

При БО волочении проверяется возможность образования ужимов, особенно при волочении тонкостенных труб $D/S > 30$, по выражению:

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{кр}} = 280 \left(\frac{S_0}{D_0} \right)^2, \quad (6.29)$$

где $\varepsilon = \frac{D_0 - D_T}{D_0}$ – относительное обжатие по диаметру; $\varepsilon_{кр}$ – критическая его

величина, при превышении которой образуются ужимы. При нарушении условия (6.29) необходимо уменьшить обжатие.

При бухтовом волочении возможно образование дефектов труб (овализации и локальных утонений стенки) при намотке на приемный барабан. Поэтому диаметр барабана не должен быть меньше минимально допустимого значения:

$$D_6 > D_6^{\min} = 4,2 \frac{(D_T - S_T)^2}{S_T}. \quad (6.30)$$

Если условие (6.30) не выполняется, нужно либо изменить сортамент труб, либо выбрать стан с нужным диаметром барабана.

Все полученные трубы не должны иметь трещин. Возможность их появления, а также микроразрушения проверяется по величине накопленной поврежденности металла труб, которая рассчитывается по формулам (6.21), (6.22):

$$\omega < [\omega],$$

где $[\omega]$ – критическое (пороговое) значение поврежденности, соответствующее требуемому назначению (качеству) труб и определяемое по формулам (1.7), (1.8).

Для уменьшения накопленной поврежденности можно уменьшить коэффициент вытяжки, снизить коэффициент трения на контактных поверхностях, разбить данный проход на несколько, ввести промежуточную термообработку.

Результаты проверки технологических ограничений сводятся в таблицу, аналогичную табл. 4.11.

Проход волочения считается возможным, если выполнены все ограничения.

Литература

1. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
2. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Тропотов А. В. Расчет маршрутов изготовления холоднодеформированных труб: учебное пособие. Свердловск: УПИ, 1989. 116 с.
3. Липкин Я. Н., Штанько В. М. Химическая и электрохимическая обработка стальных труб. М.: Металлургия, 1982. 256 с.
4. Липкин Я. Н., Коростелева Т. К., Беспалова М. Р. Современное состояние и тенденции развития химической обработки труб // Бюлл. ин-та Черметинформация. Сер. Трубное производство. Вып. 2. М., 1988. 34 с.
5. Фролов В. Ф., Данченко В. Н., Фролов Я. В. Холодная пильгерная прокатка труб. Днепропетровск: Пороги, 2005. 255 с.
6. Данченко В. Н., Сергеев В. В., Никулин Э. В. Производство профильных труб. М.: Интернет Инжиниринг, 2003. 224 с.
7. Шевакин Ю. Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. М.: Металлургиздат, 1963. 269 с.
8. Автоматизированный метод расчета калибровок рабочего инструмента станов ХПТ / В. Г. Миронов, В. И. Рябушкин, Б. Я. Митберг и др. // Сталь. 1988. № 6. С.60–62.
9. Автоматизированное проектирование многооперационных процессов холодной деформации труб / А. А. Богатов, Н. А. Смирнов, А. В. Тропотов, Г. А. Орлов, В. В. Харитонов // Труды III Конгресса прокатчиков. М.: АО “Черметинформация”, 2000. С. 465–468.
10. Орлов Г. А., Богатов А. А., Измайлов А. Р. Проектирование на ПЭВМ маршрутов холодной периодической прокатки труб: методические указания. Екатеринбург: УГТУ, 1998. 20 с.

11. Анализ на ПЭВМ маршрутов волочения и прокатки холоднодеформированных труб: методические указания / Н. А. Смирнов, В. В. Харитонов, Г. А. Орлов и др. Екатеринбург: УГТУ, 1999. 36 с.
12. Свидетельство № 20011610720 (Россия) об офиц. рег. программы для ЭВМ “Экспертная автоматизированная система проектирования технологии холодной периодической прокатки труб” от 14.06.2001 / Г. А. Орлов, А. Р. Измайлов. М.: Вестник РОСПАТЕНТа, 2001.
13. Вердеревский В. А. Роликовые станы холодной прокатки труб. М.: Металлургия, 1992. 239 с.
14. Холодная прокатка труб / З. А. Кофф, П. М. Соловейчик, В. А. Алешин, М. И. Гриншпун. Свердловск: Metallurgizdat, 1962. 431 с.
15. Орлов Г. А. Элементы теории холодной прокатки труб: учебное пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. 66 с.

Учебное издание

Орлов Григорий Александрович

ХОЛОДНАЯ ПРОКАТКА И ВОЛОЧЕНИЕ ТРУБ

Редактор *Т. Н. Газитарова*

Компьютерная верстка *Г. А. Орлова и Е. В. Орловой*

Подписано в печать	Формат 60x84 1/16.
Бумага типографская.	Плоская печать.
Уч.-изд. л. 9,7.	Тираж 80.
	Заказ 454
	Усл.печ.л. 10,98.

Редакционно-издательский отдел УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

Ризография НИЧ УрФУ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

